

Thèse de doctorat

présentée en vue de l'obtention du grade de
Docteur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon

par

Nadine ANDRIEU

Diversité du territoire de l'exploitation d'élevage
et sensibilité du système fourrager aux aléas
climatiques : étude empirique et modélisation

Sous la Direction de Michel Duru, Directeur de Recherche - INRA

Membres du jury :

Bernard Hubert	Directeur de Recherche - INRA	Rapporteur
Roger Martin-Clouaire	Directeur de Recherche - INRA	Rapporteur
Thierry Doré	Professeur - INA-PG	Président
Patrick Caron	Chercheur - CIRAD	Examineur
Etienne Josien	ICGREF - Cemagref	Examineur
André Pflimlin	Responsable Recherche et Développement Europe - Institut de l'Elevage	Examineur
Walter Rossing	Assistant Professor - Université de Wageningen	Examineur

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de thèse à qui je dois l'orientation scientifique du travail. Sa grande disponibilité, ses capacités d'écoute ont grandement contribué à mener à terme cette thèse. J'ai été très touchée par ses mots d'encouragements qui durant toute la durée de la thèse m'ont motivée et rassurée.

Je remercie Etienne Josien qui a défini le sujet de thèse et m'a encadrée au quotidien au Cemagref. Ses qualités scientifiques et de pédagogue m'ont poussée à mieux structurer ma pensée. Etienne Josien s'est également attaché à m'assurer d'excellentes conditions matérielles au sein de l'unité DFCF qui m'ont permis de travailler dans un environnement favorable.

Je remercie Christophe Poix pour m'avoir initiée aux joies de la programmation et pour s'être largement investi dans la phase de construction du modèle. J'en profite pour remercier Sylvain, Barbara et Priscilla de l'équipe REPER de l'Enitac pour leur accueil et leur bonne humeur.

Je remercie les membres de mon comité de pilotage à savoir François Coléno, Stéphane Ingrand, Laurent Dobremez, Thierry Doré, Philippe Martin qui se sont assurés du bon déroulement de la thèse.

Je remercie les agriculteurs qui ont eu la patience de répondre à mes questions, parfois très naïves ainsi que Jean-Luc Reuillon et Régine Tendille qui m'ont guidée durant cette phase de terrain.

Merci à Geneviève Bretière qui m'a aidée à traiter des données de simulation, tâche plutôt répétitive et à Sandrine Lagoutte qui avec beaucoup d'efficacité s'est occupée de la mise en page de ce document et de toutes les tâches administratives durant la thèse.

Je remercie l'équipe CERES ainsi que toute l'unité DFCF pour leur accueil. J'ai une pensée particulière pour « l'équipe Forêt » qui m'a très vite adoptée.

Je remercie mes collègues et amis Hélène, Olivier, Stéphanie, Lluís, Christophe, Damien, Martin, pour leur relecture, leurs conseils avisés et surtout leur amitié.

Je remercie enfin Lucien, Nicole, Rodrigue et Da pour leur soutien de tous les jours malgré la distance.

Sommaire

Remerciements	2
Liste des figures	6
Liste des tableaux	8

Introduction générale	10
------------------------------------	-----------

1 Systèmes d'élevage extensifs et diversité du territoire de l'exploitation agricole.....	11
2 Les systèmes d'élevage extensifs en montagne.....	12
3 Objectif de la recherche et zone d'étude	14
4 Plan de la thèse	16

Première partie : Présentation de la problématique	18
---	-----------

Introduction	19
Chapitre 1 - Définition des principaux concepts mobilisés	20
Introduction	19
1 Sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques	20
2 Utilisation du territoire et sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques	24
3 La représentation des décisions de l'éleveur	27
Conclusion.....	32
Chapitre 2 - Problématique	34
Introduction	33
1 Objet d'étude et simplifications.....	34
2 Question de recherche et hypothèses de travail.....	37
3 Démarche générale	41
Conclusion de la première partie.....	44

Deuxième Partie : Identification empirique de différentes stratégies d'utilisation du territoire	45
---	-----------

Introduction	46
Chapitre 3 - Les enquêtes exploratoires.....	47
Introduction	47
1 Méthode	47
2 Principaux résultats des enquêtes exploratoires	50
Conclusion	62
Chapitre 4 - Le suivi.....	64

Introduction	64
1 Méthode	65
2 Résultats.....	72
Conclusion.....	130
Conclusion de la deuxième partie	132

Troisième partie : Etude à l'aide d'un modèle de la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques.....	133
--	------------

Introduction	134
Chapitre 5 : Quel modèle construire ?	135
Introduction	135
1 Modélisation, définition des concepts de base	136
2 La validation des modèles	137
3 Les différents modèles d'exploitations d'élevage	140
4 L'élaboration du modèle.....	145
Conclusion.....	150
Chapitre 6 : Présentation du modèle du système fourrager.....	151
Introduction	151
1 Simplifications générales.....	151
2 Entrées	153
3 Structure générale du modèle	155
4 Le sous-modèle biophysique	155
5 Le sous-modèle décisionnel.....	162
6 Sorties	174
7 La Validation du modèle	175
Conclusion.....	183
Chapitre 7 : Comparaison par simulation des stratégies de décision pour différents territoires d'exploitation et séries climatiques.....	184
Introduction	184
1 Matériel et méthode	184
2 Résultats.....	196
Conclusion.....	231
Conclusion de la troisième partie.....	233

Conclusions générales	234
------------------------------------	------------

1 Originalité du travail.....	236
2 L'hypothèse de départ infirmée	240

3 Les restrictions réalisées	240
4 Perspectives	245

Bibliographie	250
----------------------------	------------

Annexes	259
----------------------	------------

Table des matières.....	308
--------------------------------	------------

Liste des figures

Figure 1 : Distance moyenne au siège de l'exploitation des parcelles affectées aux différents modes de récolte dans les systèmes « foin ventilé », « ensilage » et « enrubannage »	55
Figure 2 : Distance moyenne au siège de l'exploitation des parcelles de foin et de regain dans les systèmes « foin séché au sol »	56
Figure 3 : Localisation des exploitations suivies au sein des zones fourragères définies par le réseau d'élevage.....	68
Figure 4 : Diagramme précipitations-température	74
Figure 5 : Comparaison de la pluviométrie et des températures normales de l'année 2002	77
Figure 6 : Répartition des surfaces entre les ateliers de première coupe (E, FV, FS, Enr) et de pâturage des vaches laitières (P) selon le type de végétation chez chaque éleveur	82
Figure 7 : Relation entre la surface de la séquence pâturage de printemps et sa durée	88
Figure 8 : Relation entre la surface au printemps (séquence de déprimage incluse) et sa durée.....	88
Figure 9 : Relation entre la durée de la séquence de pâturage d'été et l'élargissement de la surface de pâturage.....	88
Figure 10 : Surfaces affectées aux ateliers de première coupe et au regain.....	89
Figure 11 : Relation entre la date de première coupe et la surface affectée à l'atelier regain ..	89
Figure 12 : Relation entre la date de mise à l'herbe et l'altitude	91
Figure 13 : Relation entre l'intervalle entre deux utilisations d'une même parcelle et la durée de la séquence de pâturage de printemps (sans déprimage).....	93
Figure 14 : Relation entre la date de première coupe de la première parcelle donnée aux vaches laitières l'été et la date d'élargissement de la surface de pâturage	94
Figure 15 : Précipitations et températures du mois de novembre 2002 à Laqueuille	96
Figure 16 : Répartition des surfaces (tout éleveur confondu) en fonction du type de végétation	107
Figure 17 : Distance moyenne au siège de l'exploitation des différents ateliers	108
Figure 18 : Pré-affectation des parcelles à un usage selon ses différentes caractéristiques, cas d'un système ensilage et d'une faible proportion de la SAU non fauchable	109
Figure 19 : Exemple de prise en compte de facteurs structurels ou conjoncturels pour planifier l'ordonnancement.....	118
Figure 20 : Diagramme UML de la structure du modèle du système de production	156
Figure 21 : Instanciation des différentes composantes du système de production.....	157
Figure 22 : Ensemble des actions déclenchées par le simulateur	158
Figure 23 : Exemples de données présentées aux experts pour la validation du modèle biophysique	180

Figure 24 : Les simulations	186
Figure 25 : Comparaison des normales mensuelles des stations de Landos et Marcenat	187
Figure 26 : Classement des années climatiques de la station de Landos	188
Figure 27 : Classement des années climatiques de la station de Marcenat	189
Figure 28 : Deux organisations différentes du territoire diversifié	192
Figure 29 : Récoltes moyennes de fourrages stockés en fonction de la stratégie	197
Figure 30 : Distributions moyennes de foin au pâturage en fonction de la stratégie	199
Figure 31 : Ventes moyennes de fourrages stockés en fonction de la stratégie	200
Figure 32 : Achats moyens de fourrages en fonction de la stratégie.....	201
Figure 33 : Date de mise à l’herbe en fonction de la stratégie	201
Figure 34 : Date de fin de l’atelier foin en fonction de la stratégie.....	202
Figure 35 : Proportion de foin de qualité médiocre en fonction de la stratégie	203
Figure 36 : Interaction stratégie-climat	208
Figure 37 : Interaction stratégie-niveau de diversité du territoire	213
Figure 38 : Ecart-type des différents indicateurs en fonction de la stratégie de décision	217
Figure 39 : Variabilité inter-annuelle des différents indicateurs	219
Figure 40 : Ecart-type de l’interaction stratégie-climat	222
Figure 41 : Ecart-type de l’interaction stratégie-niveau de diversité du territoire	224

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les différents types d'ateliers du système fourrager, exemples d'objectifs, de tâches et de savoirs d'après Coléno (1997).....	29
Tableau 2 : Données générales sur les éleveurs	49
Tableau 3 : Nombre de fois où un critère donné a été cité comme indicateur de déclenchement de la mise à l'herbe et de la récolte	52
Tableau 4 : Nombre de fois où un critère donné a été mentionné par les éleveurs comme déterminant de l'affectation des parcelles aux ateliers.....	56
Tableau 5 : Nombre de fois où un critère donné est mentionné comme déterminant de l'ordre d'utilisation des parcelles de pâturage ou de récolte	58
Tableau 6 : Souplesse du système fourrager	60
Tableau 7 : Exemple de structuration du système fourrager en ateliers.....	66
Tableau 8 : Liste des stations météorologiques.....	72
Tableau 9 : Température moyenne annuelle, amplitude thermique, température minimale et maximale des stations.....	73
Tableau 10 : Précipitations moyennes annuelles.....	75
Tableau 11 : Coefficients de variation des normales mensuelles de pluviométrie	76
Tableau 12 : Coefficients de variations des normales mensuelles de température	76
Tableau 13 : Présentation générale des exploitations suivies	80
Tableau 14 : Description des territoires d'exploitation.....	81
Tableau 15 : Ecart-type des caractéristiques parcellaires.....	81
Tableau 16 : Dimensionnement établi en 2002 pour les ateliers de production de fourrages stockés et pâturage des vaches laitières.....	84
Tableau 17 : Surfaces indiquées par le référentiel fourrager en zone « volcanique tout herbe » (ares/UGB)	86
Tableau 18 : Conditions de température et de pluviométrie à la mise à l'herbe.....	91
Tableau 19 : Nombre de jours d'avance (JA) à la mise à l'herbe (MH) des vaches laitières ..	92
Tableau 20 : Distance moyenne des surfaces tampon au siège de l'exploitation (km)	100
Tableau 21 : Corrélation entre type de végétation et pratiques.....	103
Tableau 22 : Altitude et exposition des parcelles affectées aux différents ateliers de production de stocks chez les éleveurs ayant plusieurs modes de conservation des fourrages.....	106
Tableau 23 : Pourcentage de la surface des ateliers de première coupe affecté au regain.....	107
Tableau 24 : Conduite du pâturage de printemps en 2002	112
Tableau 25 : Les déterminants du choix de la parcelle suivante	114
Tableau 26 : Surface maximale fauchée par jour (ha)	114

Tableau 27 : Types d’ajustements, souplesse de l’utilisation du territoire et diversité du territoire d’exploitation	122
Tableau 28 : Les stratégies testées et leur prise en compte de la diversité dans les règles d’utilisation du territoire.....	125
Tableau 29 : Liste des paramètres mobilisés par la stratégie 1	167
Tableau 30 : Exemples de données présentées aux experts pour la validation du modèle d’ensemble : « les dates ».....	178
Tableau 31 : Exemples de données présentées aux experts pour la validation du modèle d’ensemble : « les stocks fourragers »	179
Tableau 32 : Productivité des territoires "peu diversifié" et "diversifié" établie à partir de la quantité de matière sèche (MS) récoltée à deux dates pré-définies	191
Tableau 33 : Description des territoires "peu diversifié" et "diversifié"	191
Tableau 34 : Ecart-types des principaux attributs	191
Tableau 35 : Analyse de variance de l’effet stratégie	198
Tableau 36 : Tableau récapitulatif des principaux résultats	204
Tableau 37 : Moyenne et écart-type de l’indicateur synthétique (en jours).....	205
Tableau 38 : Analyse de variance de l’interaction stratégie-climat	206
Tableau 39 : Analyse de variance de l’interaction stratégie-niveau de diversité du territoire.....	210
Tableau 40: Analyse de variance des écart-types pour la stratégie et ses interactions avec le climat et le niveau de diversité du territoire	215

Introduction générale

1 Systèmes d'élevage extensifs et diversité du territoire de l'exploitation agricole

Jusque dans les années 80, les politiques agricoles française et européenne ont, par un soutien aux produits, encouragées l'intensification. L'intensification fait référence au facteur terre, facteur le plus rigide et souvent le plus onéreux (Landais et Balent, 1995) et désigne l'augmentation des quantités de capital et d'intrants utilisées par hectare. La suppression des facteurs limitants s'est traduite par une uniformisation des systèmes de production, ce qui également en facilitait la gestion. Cela s'est traduit en outre dans les zones difficiles par des abandons de parcelles en fonction de critères d'utilisabilité (distance ou accès, mécanisabilité...) (Tasser et Tappeiner, 2002).

Depuis les années 90, les politiques agricoles ont évolué de façon à encourager **l'extensification** par des soutiens à l'hectare (prime à l'herbe pour les exploitations herbagères), en vue de **maintenir ou d'accroître la diversité biologique** qui est devenue un enjeu (Kirchmann et Thorvaldsson, 2000).

Cette évolution s'inscrit dans un contexte de saturation des grands marchés agricoles, de dégradation du rapport entre prix agricoles et prix industriels, d'évolution de la démographie agricole due à un déséquilibre entre les installations et les cessations d'activités. En conséquence, une tendance à l'accroissement de la surface moyenne de l'exploitation est observée depuis deux décades. Dans le cas de l'élevage des herbivores, cette tendance a conduit à l'émergence d'un nouvel objet de recherche : les systèmes d'élevage extensifs, qui au-delà de leur diversité présentent des caractéristiques communes (Landais et Balent, 1995). L'émergence de ces systèmes en tant qu'objet de recherche relève de la nécessité de renouveler les références produites jusque là pour les systèmes intensifs.

Les systèmes d'élevage extensifs peuvent être schématisés en deux types : les systèmes herbagers reposant sur la clôture et la culture de l'herbe et les systèmes pastoraux utilisant des parcours (Landais et Balent, 1995).

L'une des principales caractéristiques de ces systèmes est la grande diversité spatio-temporelle des végétations utilisées au sein d'une même exploitation agricole (Landais et Balent, 1995 ; Armstrong *et al.*, 1997 ; Bernhard, 2002). Il peut s'agir de prairies permanentes et de parcours herbacés ou ligneux, de cultures fourragères. Au sein du territoire

d'exploitation, cette diversité résulte également des différences d'exposition, de sol ou d'altitude.

Plusieurs auteurs se sont intéressés aux modes de gestion de la diversité du territoire dans les systèmes d'élevage extensifs. Altieri (1999) montre ainsi l'intérêt de la diversité des espèces et variétés végétales pour le contrôle de la population de ravageurs, la fertilité du sol ou l'état phytosanitaire des plantes cultivées.

Quant à White *et al.* (2004), ils encouragent, compte tenu de la diversité spatio-temporelle des conditions climatiques ou pédologiques, le développement à l'échelle du territoire de l'exploitation des communautés d'espèces fonctionnellement diversifiées : la présence de certaines espèces ou variétés se justifiant par leur potentiel de croissance et leur qualité, d'autres pour leur tolérance aux contraintes climatiques.

Pour Landais et Balent (1995), l'hétérogénéité et la variabilité qualitative des végétations sont acceptées voire recherchées dans les systèmes extensifs, compte tenu de leur rôle dans les régulations internes face aux aléas.

Duru et Hubert (2003) mentionnent un rôle tampon de la végétation face aux aléas climatiques. Ce rôle tampon résulte des variations de croissance et de phénologie de l'herbe liées à l'intensité et à la fréquence de défoliation (Duru *et al.*, 1998).

Même si les systèmes d'élevage extensifs ne se rencontrent pas exclusivement en zones de montagne, ces dernières présentent des caractéristiques structurelles limitant l'intensification. En d'autres termes la plupart des systèmes d'élevage en montagne sont des systèmes extensifs.

2 Les systèmes d'élevage extensifs en montagne

Deux critères physiques définissent la zone de montagne : l'altitude et la pente même si ces deux critères ne sont pas forcément associés (Peltier, 1985).

L'altitude engendre en particulier deux types de conséquences :

- un allongement de l'hiver et une réduction de la période de croissance des végétaux de l'ordre de 8 à 9 jours par 100 mètres d'altitude ;

- un accroissement du nombre de jours de gelées en période de végétation (Dixmerias, 1985).

Mathieu *et al.* (1986) montrent une réduction de 23% de la production fourragère potentielle en montagne par rapport à la plaine.

Les critères de pente associés à l'isolement et la dispersion des territoires d'exploitation engendrent des problèmes de mécanisation et limitent le débit des chantiers de récolte. Les conditions pour réaliser les stocks fourragers en quantité et qualité suffisantes sont donc plus difficiles en montagne que dans les régions de plaine alors que les besoins sont supérieurs à cause d'une durée plus longue de l'hiver (Gibon et Duru, 1987). Selon ces auteurs, les caractéristiques structurelles accentuent la dépendance des systèmes extensifs de montagne aux aléas climatiques.

Ces caractéristiques structurelles majorent les coûts de production qu'il s'agisse des équipements de récolte, des bâtiments ou encore de l'alimentation des troupeaux (achats de concentrés à cause de la réduction des surfaces en céréales). De plus, les limites de l'intensification fourragère et la faible rentabilité en montagne des surfaces non fourragères (essentiellement céréales) réduisent la dimension du troupeau dans les exploitations de montagne.

Pour ces exploitations de montagne, la valorisation des produits par l'adoption de cahiers des charges peut alors contribuer à la compensation des handicaps subis (Dixmerias, 1985 ; Liénard *et al.*, 1985).

Or certaines mesures de cahiers des charges, pensées dans un objectif de différenciation (signes officiels de qualité mais également signes contractuels liés à un cahier des charges préétabli) ou de gestion du territoire, peuvent accentuer la dépendance des exploitations d'élevage aux aléas climatiques. Ceci est particulièrement vrai lorsque ces mesures portent sur le mode de conservation des fourrages. On peut citer par exemple les mesures visant à limiter les achats de foin afin de renforcer le lien au terroir (les certificats de conformité « groupement d'intérêt économique fleur de limousine » ou « association viandes de qualité du cantal »). D'autres mesures visent à retarder les dates de fauche afin de préserver les espèces naturelles dans les zones d'intérêt faunistique et floristique (la mesure 16.1 des contrats territoriaux d'exploitation (CTE) ou des contrats d'agriculture durable (CAD)). D'autres encore interdisent l'utilisation de fourrages fermentés (syndicats d'appellation

d'origine contrôlée (AOC) Abondance, Beaufort, Comte, Mont d'or, Morbier, Picodon, Reblochon, Tome des Bauges,).

Les achats de foin peuvent limiter la dépendance aux aléas climatiques en cas de production fourragère insuffisante. Le retard de fauche, lorsqu'il concerne une part non négligeable de la surface de fauche, peut entraîner une baisse de la qualité du foin récolté et retarder la mise à disposition des repousses pour les vaches durant l'été. Il peut en outre limiter la possibilité de récolter du regain et donc la constitution de stocks fourragers. Les risques de ruptures alimentaires sont donc accrus durant les années où la production d'herbe est faible. L'interdiction de fourrages fermentés met en cause des techniques de conservation des fourrages (ensilage et enrubannage) qui se caractérisent pourtant par leur souplesse d'adaptation aux conditions climatiques (Dupic, 1998 ; Veillaux et Lépée, 1998), raison qui avait motivé leur adoption. La récolte plus précoce par ces techniques par rapport au foin permet de conserver l'herbe à un stade plus jeune, de meilleure qualité et de produire plus tôt et davantage de regains à faucher ou à pâturer (de Montard et Blanchon, 1985). Ces techniques permettent donc de s'affranchir partiellement de la contrainte climatique.

Pour les exploitations de montagne, la recherche d'une valorisation par l'adoption des cahiers des charges nous a semblé mettre en évidence un paradoxe : adopter des cahiers des charges qui augmentent la dépendance aux aléas climatiques d'exploitations déjà très marquées par une contrainte climatique forte.

Dans ce contexte et au sein des différentes fonctions de la diversité du territoire citées par Altieri (1999), Landais et Balent (1995), Duru et Hubert (2003), son « rôle tampon » face aux aléas climatiques représente un enjeu important.

3 Objectif de la recherche et zone d'étude

La possibilité pour les exploitations d'élevage de limiter leur dépendance aux aléas climatiques en tenant compte de la diversité du territoire d'exploitation a été mentionnée de façon plus ou moins explicite (Landais et Balent, 1995 ; Duru et Hubert, 2003 ; White *et al.*, 2004). Cependant ces auteurs ne précisent ni le mécanisme par lequel cette diversité peut réduire la dépendance des exploitations aux aléas climatiques ni l'ampleur de cette réduction. De plus leurs travaux se focalisent sur la diversité des végétations. Or les différences d'exposition, de sol ou d'altitude créent à l'échelle de la parcelle un micro-climat particulier

influant sur la production de biomasse, son accessibilité (portance) et sa précocité. Les différences d'altitude entre parcelles se traduisent par des écarts de températures. Les différences d'exposition influent sur le rayonnement reçu (Legros *et al.*, 1997), ainsi que sur la température. La texture et la profondeur de sol influent, à travers le bilan hydrique, sur la production de biomasse et la portance. Dans le contexte des systèmes d'élevage de montagne, nous proposons d'étudier la possibilité pour les exploitations d'élevage de limiter leur dépendance aux aléas climatiques par l'utilisation de la diversité du territoire. Nous considérons à la fois la diversité des végétations mais également la diversité d'altitude, d'exposition, de sol susceptibles de contribuer à ce rôle tampon.

L'étude d'exploitations d'élevage ayant adopté des cahiers des charges susceptibles d'accroître leur dépendance aux aléas climatiques peut mettre en évidence des modes de prise en compte différents de la diversité du territoire. L'adoption de ces cahiers des charges constitue donc une voie d'entrée vers une recherche qui porte plus largement sur l'utilisation de la diversité du territoire face aux aléas climatiques. En Auvergne, plusieurs syndicats AOC envisagent la révision des cahiers des charges avec notamment l'interdiction de l'ensilage et l'enrubannage. Cette révision met alors en lumière le paradoxe mentionné et fait de l'Auvergne une zone d'étude privilégiée.

Bien que le poids des handicaps naturels y soit plus modéré que dans les zones plus accidentées des Alpes ou des Pyrénées (Guimet, 1985), les contraintes rencontrées en Auvergne sont néanmoins spécifiques au contexte montagnard. La durée d'hivernage est longue et dépasse souvent six mois (Vioilleau, 1998). La grande majorité des exploitations d'élevage repose sur l'herbe, la prairie naturelle occupant 78 % de la surface agricole utile (SAU) (DRAF Auvergne, 2002). Le chargement moyen est de l'ordre de 1 Unité Gros Bovin (UGB) par hectare et les niveaux de fertilisation sont faibles (Réseaux d'élevage, 2001b).

La multiplicité de contrats semble illustrer cette préoccupation constante des systèmes montagnards à rechercher une valorisation pour pallier leur manque de compétitivité.

En Auvergne, une exploitation sur cinq valorise sa production sous un signe de qualité (DRAF Auvergne, 2002). Au sein de ces signes de qualité, les AOC fromagères figurent en bonne place puisqu'avec six fromages AOC (Cantal, Salers, Saint Nectaire, Bleu d'Auvergne, Fourme d'Ambert, Fourme de Montbrison), l'Auvergne est la première région française productrice de spécialités fromagères bénéficiant d'une appellation d'origine contrôlée (Chambre d'agriculture d'Auvergne, 2001).

Dans un contexte de renforcement des exigences de sécurité sanitaire et de recherche d'authenticité pour les AOC fromagères, les syndicats de défense d'AOC fromagères Cantal et Saint Nectaire envisagent d'inscrire dans la définition de leurs conditions de production, l'interdiction de l'utilisation d'ensilage et d'enrubannage pour l'alimentation des vaches laitières (Reuillon *et al.*, 2001) à l'image des AOC Abondance, Beaufort ou Comte pour ne citer que ceux-là.

Cette révision des cahiers des charges vise à assurer une meilleure valorisation du lait puisque paradoxalement l'Auvergne est la région où le prix de base du lait est le plus faible en France. Il s'agirait aussi de limiter les risques sanitaires et par conséquent les pertes liées à la présence de *Listeria monocytogenes*. L'AOC serait enfin un outil d'aménagement du territoire et de développement rural en permettant de maintenir les agriculteurs sur le territoire grâce à la plus value dégagée (Chalvet, 2002).

Cette révision des cahiers des charges nous offre la possibilité d'étudier des systèmes extensifs de montagne doublement contraints par les aléas climatiques (compte tenu des cahiers des charges et de leurs caractéristiques structurelles) et pour lesquels la diversité du territoire peut être mise à profit.

4 Plan de la thèse

Cette thèse comporte trois grandes parties. Dans la première, nous précisons la problématique. Elle ne peut être clairement formulée sans la définition précise de deux concepts clefs « l'utilisation du territoire » et la « sensibilité aux aléas climatiques ». L'utilisation du territoire représente l'ensemble des règles de décision et pratiques permettant ou non de mettre à profit la diversité du territoire d'exploitation. Nous définissons la sensibilité aux aléas climatiques comme la variabilité des résultats de production sous l'effet des aléas climatiques. A partir de ces définitions nous délimitons le cadre précis de notre recherche. Nous montrons la nécessité de définir une grille de lecture pour décrire l'utilisation du territoire et utilisons une structuration du système en ateliers de productions. Cette grille de lecture inspirée des travaux de Coléno (1997) permet de caractériser les hypothèses de travail à tester.

Les deuxième et troisième parties présentent la démarche mise en œuvre pour tester les hypothèses de travail. Cette démarche repose en grande partie sur la construction d'un modèle de simulation. La propriété étudiée, à savoir la dépendance des exploitations aux aléas

climatiques, implique une échelle d'étude pluriannuelle. Nous montrerons qu'à cette échelle d'étude, le recours à la modélisation constitue la façon la plus rapide d'obtenir des résultats.

La seconde partie détaille une étude de terrain destinée à construire ce modèle. Dans cette étude et compte tenu de la grille de lecture de l'utilisation du territoire retenue, nous analysons les décisions d'éleveurs laitiers. Cette analyse permet d'élaborer des stratégies virtuelles d'utilisation du territoire permettant de tester nos hypothèses.

Dans la troisième partie, en nous basant sur les connaissances apportées par la phase de terrain mais aussi en étudiant les modèles existants appliqués aux exploitations d'élevage, nous définissons le modèle à construire pour notre recherche. Ce modèle est utilisé pour réaliser des simulations pluri-annuelles des stratégies élaborées à partir de la phase précédente. La comparaison des résultats de simulation permet alors de tester nos hypothèses de travail.

Dans une conclusion générale nous discutons les choix méthodologiques effectués et développons les perspectives de cette recherche.

Première partie : Présentation de la problématique

Introduction

L'objectif général de la thèse est d'étudier la possibilité pour les exploitations d'élevage de limiter leur dépendance aux aléas climatiques par l'utilisation de la diversité du territoire. Cet énoncé général est imprécis, il nous faut définir les termes employés. Pour caractériser de façon générale le rapport entre exploitations d'élevage et aléas climatiques nous avons employé le terme de « dépendance », non pas pour rendre compte d'une relation statistique mais pour rendre compte d'une contrainte forte imposée par les aléas climatiques sur l'organisation des exploitations d'élevage. Dans cette recherche, nous employons désormais le terme de « sensibilité » aux aléas climatiques. La sensibilité traduit une idée de réaction aux variations de l'environnement. Nous montrons dans cette partie que les variations de l'environnement constituent une contrainte majeure de l'organisation des exploitations d'élevage. Le concept « d'utilisation du territoire » n'est pas non plus défini. Il rend compte des modes de mise en valeur du territoire d'exploitation et notamment de sa diversité.

Dans cette partie nous nous proposons de définir ces concepts et d'affiner l'énoncé général de la thèse. La définition des différents concepts fait l'objet du chapitre 1. Le chapitre 2 présente la problématique et la démarche générale qui en découlent.

Chapitre 1 - Définition des principaux concepts mobilisés

Introduction

L'exploitation d'élevage peut être décomposée en différents sous ensembles correspondant à autant d'échelle et d'objet d'étude différents. Au sein de ceux-ci, le « système fourrager » apparaît particulièrement pertinent lorsqu'il s'agit d'étudier la sensibilité des exploitations d'élevage aux aléas climatiques. Nous allons dans la suite de cette recherche réduire notre analyse à ce système. Dans la section 1 nous explicitons pourquoi le système fourrager est l'échelle pertinente pour étudier l'influence de la contrainte climatique sur les exploitations d'élevage. Nous définissons également le concept de sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Nous déterminons ensuite le deuxième concept-clef de notre recherche à savoir l'utilisation du territoire d'exploitation et montrons comment il se situe au sein des régulations mobilisées par l'éleveur face aux aléas climatiques. Nous proposons enfin une grille de lecture des décisions mises en œuvre par l'éleveur pour la conduite du système fourrager.

1 Sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques

1.1 Le système fourrager

Selon Duru *et al.* (1988b), le terme de « système fourrager » est apparu dans le vocabulaire dès les années 1959-1960 mais fut employé plus fréquemment à partir des années 1970. Ce concept dérive de celui de l'approche globale de l'exploitation qui repose sur deux principes clefs : les agriculteurs ont des raisons de faire ce qu'ils font, l'exploitation est vue comme un système (Bonneville *et al.*, 1989). Dans l'approche globale de l'exploitation, le système fourrager constitue l'un des « systèmes d'opérations » (par opposition aux « systèmes de décision » ou « d'information ») à étudier pour caractériser le fonctionnement du système d'exploitation. Dans le cadre des exploitations d'élevage d'herbivores, la maîtrise du système fourrager est un enjeu majeur. A tel point que certaines définitions du système fourrager ne distinguent pas clairement « système fourrager » et « système d'exploitation » puisqu'elles définissent le premier comme un « ensemble de techniques allant du choix des fourrages jusqu'au revenu de l'éleveur en passant par l'assolement fourrager, la conduite générale de

l'élevage, les investissements et le travail à mettre en œuvre, sans négliger le niveau technique de l'éleveur, ses goûts et ses idées personnelles (Huget et Mansat, 1977). Même si la caractérisation du système fourrager est une étape cruciale dans la description du fonctionnement du système d'exploitation, il s'en distingue dans le sens où il rend davantage compte d'un équilibre entre ressources fourragères et besoins des animaux conformément aux objectifs et aux conditions de fonctionnement de cet élevage.

Ainsi nous reprenons la définition d'Attonaty (1980) pour laquelle le système fourrager est l'ensemble des moyens de production, des techniques et des processus qui, sur un territoire, ont pour fonction d'assurer la correspondance entre le ou les systèmes de culture et le ou les systèmes d'élevage.

L'étude des systèmes fourragers nécessite donc la connaissance des processus biologiques qui concourent à l'élaboration des productions mais elle concerne surtout la prise en compte des décisions qui régissent ces processus (Duru *et al.*, 1988b) pour tenter de les équilibrer. Selon ces auteurs le système fourrager est un concept opératoire pour étudier les conditions d'adaptation à la variabilité et la gestion de l'aléatoire. Il est donc pertinent pour l'étude des modes de gestion de la contrainte climatique.

1.2 Les aléas climatiques

Le climat intervient de trois manières dans l'alimentation des animaux (Duru *et al.*, 1998) :

- sur la production des ressources, à travers des facteurs tels que la température, le déficit hydrique (précipitations, évapotranspiration), et le rayonnement reçu ;
- sur la durée de la période d'arrêt de la pousse de l'herbe du fait du stress hydrique ou thermique ;
- sur la durée de non accès malgré les disponibilités. En effet, le nombre de jours nécessaires pour le séchage du fourrage après la coupe (conditionné par les facteurs radiation, température, hygrométrie et vent), l'enneigement au sol, l'excès d'eau, la portance affectent l'accès aux ressources.

Le climat a également des effets directs sur la physiologie et le comportement des animaux et sur les conditions de développement des pathogènes influençant l'importance des besoins alimentaires du troupeau (Gibon et Duru, 1987).

Les processus biologiques sur lesquels portent les décisions de l'éleveur de même que la réalisation des pratiques culturales sont donc soumis au climat, mais c'est essentiellement l'ampleur des variations inter-annuelles qui font du climat une contrainte importante (Duru *et al.*, 1998) à cause de l'incertitude engendrée (McCown, 2002). Le terme d'aléa climatique est alors plus approprié.

Le terme d'« aléa » est employé pour désigner un phénomène incertain en grande partie imprévisible obéissant le plus souvent à un déterminisme inconnu ou mal connu (Eldin, 1989). L'aléa se caractérise par une intensité, et une probabilité d'apparition en un lieu donné, et au cours d'un intervalle de temps donné (Carbonel et Margat, 1996). Tout phénomène climatique peut par conséquent être qualifié d'aléa dans la mesure où les modèles climatiques, quoique de plus en plus fiables, ne peuvent décrire avec certitude son occurrence et généralement que sur un horizon restreint (3 à 5 jours).

Mais l'aléa désigne le plus souvent un écart par rapport à la situation normale (Eldin, 1989, de Jager *et al.*, 1998 ; Ingram *et al.*, 2002). On parle alors d'aléa lorsque intervient un phénomène d'intensité supérieure ou inférieure à une normale établie sur une longue série d'années. Ainsi dans le cadre du système fourrager, les aléas climatiques désignent tout aussi bien des conditions plus défavorables que la normale pour la croissance de l'herbe et l'accès aux ressources que des conditions très favorables : une séquence de jours pluvieux pouvant gêner la mise à l'herbe ou la récolte de foin, un cumul des températures entraînant une forte croissance de l'herbe.

1.3 Définition de la sensibilité aux aléas climatiques

Les aléas climatiques rendent difficile l'équilibre entre l'offre fourragère et la demande du troupeau et engendrent des difficultés de gestion du pâturage ou des stocks fourragers (Charpentreau et Duru, 1983). Pour mieux maîtriser le système et atteindre les objectifs fixés, les stratégies de gestion élaborées par les éleveurs visent à minimiser les variations du système (Romera *et al.*, 2004). Certaines des décisions prises par l'éleveur ont donc pour objectif de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques.

La sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques se traduit par une variabilité inter-annuelle des résultats de production (concernant la ressource fourragère et/ou la production animale) en fonction du climat. Cette variabilité inter-annuelle des résultats de production peut concerner une période donnée de l'année (la période de printemps par exemple) ou son ensemble. Mais dans les deux cas elle est susceptible d'induire un déséquilibre entre l'offre et la demande fourragère. Plus les résultats de production varient en fonction du climat plus ce système fourrager est considéré sensible.

Selon Charpentreau et Duru (1983) la performance d'un système d'élevage peut s'écrire selon l'équation suivante :

$$R_i = f(\theta_i, M, S)$$

où θ_i est l'ensemble des variables climatiques, M l'ensemble des variables de gestion de la production d'herbe et du troupeau, S, l'ensemble des variables de structure.

La sensibilité aux aléas climatiques dépend donc des structures des exploitations et des modalités de gestion techniques mises en œuvre par l'éleveur (Gibon et Duru, 1987).

Les variables de structure correspondent par exemple au nombre d'animaux, à la SAU ou à la chaîne de récolte de l'exploitation. Ainsi un système de récolte ensilage est *a priori* moins sensible aux aléas climatiques qu'un système foin séché au sol. Dans la mesure où l'ensilage nécessite des durées de séchage au sol plus courtes, le système est moins sujet aux aléas climatiques et ses résultats de production moins fluctuants qu'un système foin séché au sol.

Les modalités de gestion techniques mises en œuvre peuvent consister à recourir à des ressources externes (achat de stocks, concentrés,...) ou à une organisation interne des ressources de l'exploitation différente (Charpentreau et Duru, 1983).

Selon cette définition de la sensibilité aux aléas climatiques d'un système (dépendance se manifestant par une variabilité inter-annuelle des résultats de production), elle ne peut être évaluée que sur plusieurs campagnes. L'évaluation de cette sensibilité se fait à travers les résultats de production (production fourragère et animale) et non à travers les modalités de gestion techniques définies par Charpentreau et Duru. Cela signifie qu'à partir du moment où les résultats de production sont maintenus d'année en année, le système n'est pas considéré comme sensible même si pour cela, l'éleveur a dû procéder à une réorganisation interne de ses pratiques ou recourir à des ressources externes. En d'autres termes, un système ayant recours à des ressources externes pour assurer des résultats de production constants n'est pas plus sensible qu'un système n'ayant pas nécessité ce recours aux intrants. De même un système fourrager où chaque année les pratiques font l'objet d'une réorganisation pour assurer le

maintien des résultats de production n'est pas jugé plus sensible qu'un système où les pratiques seraient identiques. Cette définition de la sensibilité du système fourrager est donc relativement large puisque tous les moyens sont permis pour limiter la sensibilité du système fourrager.

Au sein des pratiques pouvant faire l'objet d'une réorganisation, un certain nombre relèvent de l'utilisation du territoire d'exploitation. Nous allons maintenant définir ce concept.

2 Utilisation du territoire et sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques

2.1 Définition de l'utilisation du territoire

Girard *et al.* (2001) définissent l'utilisation du territoire comme l'ensemble des pratiques d'affectation (affectation des cultures à des parcelles, des lots d'animaux à des lieux de contention, des lots d'animaux au pâturage) qui se déroulent à l'échelle d'une campagne. Ces auteurs distinguent ces pratiques de celles relevant de la configuration du territoire qui correspondent à des pratiques de constitution, d'aménagement ou de mise en valeur du territoire. Dans le cadre du système fourrager l'utilisation du territoire concerne plus précisément les affectations de parcelles au pâturage des animaux ou à la récolte de stock avec les pratiques de fertilisation associées.

L'utilisation du territoire est la résultante de nombreux déterminants. A partir de cas en élevage ovin, Girard *et al.* (2001) ont démontré le lien existant entre des prototypes d'utilisation du territoire et les conduites de reproduction des animaux.

Pour d'autres auteurs, les caractéristiques parcellaires, vues en termes de contraintes, constituent un déterminant majeur de l'utilisation du territoire. Morlon et Benoit (1990) ont proposé une classification des contraintes liées au terrain en distinguant d'une part les contraintes d'ordre physique (topographie et caractéristiques du sol) ou juridique, et d'autre part celles liées à la structure du territoire utilisé (dimension et forme des parcelles, distances entre elles et aux bâtiments, obstacles à franchir pour y accéder). Ces auteurs proposent de hiérarchiser ces contraintes et de les croiser dans un tableau afin d'établir le lien entre les caractéristiques des parcelles et leur utilisation. Dans le cadre d'élevage bovin extensif, Josien *et al.* (1994) opèrent un découpage structurel du territoire d'exploitation en îlots (des ensembles de parcelles séparés les uns des autres par un obstacle aux déplacements). Ces îlots

se révèlent comme des unités au sein desquelles se raisonnent en cohérence avec un projet de production, les utilisations par les lots d'animaux et la fauche, les rotations céréales/prairies temporaires. Thenail et Baudry (2004) démontrent que le réseau de haies en Bretagne influence l'utilisation du territoire et est plus déterminant que le contexte socio-économique, technique ou productif du système d'élevage.

D'autres auteurs privilégient une étude fonctionnelle de l'utilisation du territoire, basée sur l'analyse des fonctions des différentes parcelles. Même si les caractéristiques du territoire influent sur les fonctions attribuées aux parcelles (Jeanin *et al.*, 1991 ; Fleury *et al.*, 1996) l'accent est mis sur les objectifs qui leurs sont assignés. L'éleveur détermine alors des fonctions alimentaires, sécuritaires ou encore de surveillance (Guerin et Bellon, 1990 ; Bellon *et al.*, 1999) et combine une diversité de végétations et de pratiques de pâturage pour atteindre les objectifs fixés.

Soulard *et al.* (2002) se sont quant à eux, interrogés sur la relation entre l'utilisation du territoire et les unités territoriales de gestion de l'environnement, qui constituent des territoires englobant à l'échelle desquels se posent des questions d'environnement (préservation des zones de nidification de l'avifaune, qualité de l'eau). Ces auteurs démontrent que la prise en compte par l'agriculteur de questions d'environnement implique des pratiques territoriales spécifiques (localisation des bandes de jachère, politique de drainage, ...) afin de mettre en cohérence logique agricole et logique environnementale.

Dedieu *et al.* (1997) ou Madelrieux *et al.* (2002) se sont intéressés à la relation entre contraintes de travail et utilisation du territoire de l'exploitation. Ainsi, à travers la caractérisation de l'allotement des troupeaux et de la circulation des lots sur le territoire d'exploitation, Dedieu *et al.* (1997) montrent que le découpage du territoire en sous unités autonomes est fonction des tâches de manipulations d'animaux (traitements sanitaires, sevrages, tris de lots...), de déplacements ou de surveillance.

L'utilisation du territoire d'exploitation résulte de l'ensemble de ces déterminants. Mais compte tenu de l'impact important des aléas climatiques sur l'organisation des activités ainsi que sur les processus biologiques, on peut s'interroger sur leur place au sein de l'ensemble des déterminants de l'utilisation du territoire. En d'autres termes on peut s'interroger sur la manière dont l'utilisation du territoire permet de limiter la sensibilité aux aléas climatiques.

2.2 Différentes régulations pour limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques

Face aux variations du système engendrées par les aléas climatiques, les éleveurs mettent en œuvre des régulations qualifiées également de solutions de rechange.

Ces régulations sont pour certaines structurelles ou stratégiques (diminuer le chargement, augmenter la capacité des équipements de récolte), et pour d'autres conjoncturelles (modification au coup par coup des apports de fertilisants, achat de foin) (Charpentreau et Duru, 1983 ; Duru *et al.*, 1998).

Mathieu et Fiorelli (1990) décrivent plusieurs régulations qui peuvent intervenir dans un pâturage pour s'adapter aux différences de pousse de l'herbe, d'accessibilité des parcelles ou de comportements des animaux induits par la variabilité climatique. Ces régulations consistent à faucher les refus, apporter des engrais azotés, modifier le temps de séjour sur une parcelle, l'ordre des parcelles, la surface pâturée par adjonction ou retrait d'une parcelle, les effectifs d'animaux qui pâturent, les apports d'aliments extérieurs au pâturage ou encore l'objectif de production. A ces régulations on peut ajouter la modification des pratiques d'élevage concernant l'allotement, la reproduction ou l'alimentation (tarissement précoce) (Fleury *et al.*, 1995).

Parmi les régulations citées, un certain nombre d'entre elles relèvent de l'utilisation du territoire. Ce type de régulation est selon Duru *et al.* (1998) spécifique des systèmes extensifs. Ces auteurs distinguent en effet deux grandes logiques d'organisation des systèmes fourragers en référence à l'aléa climatique. L'une vise à corriger les variations saisonnières et inter-annuelles de ressources en utilisant des intrants (fertilisation, irrigation, achats d'aliments, équipements pour la récolte). Elle nécessite des dépenses importantes et est souvent associée à des performances zootechniques élevées. L'autre logique cherche au contraire à tirer parti de l'aptitude des prairies ou des parcours à subir des taux de prélèvement instantanés variables, de même que de la tolérance des animaux à la sous-alimentation. Dans les systèmes d'élevage intensifs où le niveau de performance visé est moindre, le recours à des régulations internes permet de limiter les coûts de production (Landais et Balent, 1995). Ces régulations internes reposent sur le rôle tampon de la diversité du territoire que nous cherchons à caractériser.

La possibilité de mettre à profit la diversité du territoire pour améliorer l'efficacité du système (limitation des quantités de foin distribuées) face aux aléas climatiques (Guérin et Bellon,

1990 ; Bellon *et al.*, 1999) a été mentionnée par d'autres auteurs sans qu'aucun d'entre eux ne cherchent précisément à la caractériser.

Pour explorer cette possibilité, il faut disposer d'une grille de lecture permettant d'appréhender la manière dont l'éleveur associe dans ses décisions d'utilisation du territoire diversité et régulations face aux aléas climatiques.

3 La représentation des décisions de l'éleveur

Nous avons vu que l'étude du système fourrager concernait la prise en compte des décisions qui régissent les processus biologiques concourant à l'élaboration de la production (section 1.1). Il convient donc de s'interroger sur les grilles de lecture proposées par les auteurs pour appréhender les décisions de l'éleveur.

3.1 Le modèle d'action

Sébillotte et Soler (1990) ont proposé un modèle explicatif de la prise de décision de l'agriculteur qui s'organise autour des trois points suivants :

- un ou plusieurs objectifs généraux qui définissent le terme vers lequel convergent les décisions de l'agriculteur ;
- un programme prévisionnel et des états-objectifs intermédiaires qui définissent des points de passage obligés et des moments où l'agriculteur peut faire des bilans en vue de « mesurer » où il en est de la réalisation de ses objectifs généraux ; se trouvent ainsi fixés les indicateurs qui serviront aux décisions ;
- un corps de règles qui en fonction d'un champ d'événements futurs perçus comme possibles par l'agriculteur, définit, pour chaque étape du programme, la nature des décisions à prendre pour parvenir au déroulement souhaité des opérations et la nature des solutions de rechange à mettre en œuvre si, à certains moments, ce déroulement souhaité n'est pas réalisable.

L'ensemble constitue ce que Sébillotte et Soler (1990) qualifient de *modèle de comportement* ou modèle d'action de l'agriculteur. Il conditionne doublement les décisions de ce dernier, d'une part parce qu'il structure la perception de sa situation par l'agriculteur, d'autre part parce qu'il fixe les actions à entreprendre pour atteindre les objectifs retenus.

Le processus décisionnel peut donc se décomposer en une phase de décision au cours de laquelle le décideur se construit une représentation du problème, une phase de sélection durant laquelle il choisit parmi plusieurs options possibles et enfin une phase d'évaluation où le décideur effectue une mesure des résultats de son action.

Cette représentation parvient à rendre compte de la prise de décision tant au niveau de l'exploitation qu'au niveau de la gestion de différentes activités de production.

Cependant le modèle d'action ne permet pas de considérer la compétition qui peut exister lorsque ces différentes activités mobilisent les mêmes ressources (terre, travail, matériel...) (Coléno, 1997). De plus, il met l'accent sur l'organisation temporelle des décisions au détriment de l'organisation spatiale (Girard *et al.*, 2001). Ce modèle ne paraît donc pas adapté puisqu'il ne permet pas de rendre compte des décisions d'utilisation du territoire.

3.2 Décomposition du système de production

S'inspirant des sciences de gestion industrielle, différents auteurs citent la nécessité de décomposer le système de production en ensembles élémentaires (Chatelin *et al.*, 1993 ; Hémidy *et al.*, 1993 ; Aubry *et al.*, 1998 ; Girard et Hubert, 1999). En effet, les décisions prises en particulier dans le cadre du système fourrager, relèvent d'horizons de temps ou de domaines différents. Pour aborder ces niveaux de décision multiples, l'éleveur réalise un découpage du fonctionnement de son exploitation en champs de décision qu'il essaie de traiter de la manière la plus autonome possible au quotidien. L'éleveur réalise cependant un aller-retour entre ces niveaux locaux et un niveau global notamment lorsque des conflits se posent.

Pour rendre compte du découpage réalisé par l'éleveur, le système de production peut alors être décomposé en entités de gestion autonomes. Ce découpage, en structurant le système de production permet de faciliter l'analyse des décisions.

A la suite de ces auteurs, et en faisant l'analogie entre la gestion de production industrielle et l'agriculture, Coléno (1997) a proposé le concept d'atelier de production. Il définit l'atelier comme un ensemble de tâches élémentaires (intervention technique) dont l'organisation et l'exécution nécessitent un certain nombre de savoirs spécifiques en relation avec l'objectif de production assigné à cet atelier. Les « savoirs-faire » vont permettre de décider des tâches à effectuer, les « savoirs-comprendre » concernent plus spécifiquement la connaissance du matériel biologique en relation avec l'objectif de production (Coléno, 1997). La production de

fourrages stockés (ensilage, foin...), le pâturage ou la conduite du troupeau répondent à des logiques de production et des temporalités différentes. Par exemple, la conduite du troupeau laitier doit permettre d'assurer la production laitière par une gestion des mises bas et de son renouvellement établie en fonction du prix du lait, des ressources et du quota. Le rôle des stocks et du pâturage est de fournir au troupeau les aliments nécessaires pour assurer la production de lait et son entretien. Pour ces différentes activités, ce sont donc autant de tâches et de savoirs spécifiques qui sont mobilisés (tableau 1).

Le système fourrager comprend ainsi des ateliers « troupeau », qui transforment des aliments en lait ou viande et des ateliers « fourragers » (« pâturage » ou « production de stocks ») qui produisent des aliments destinés au troupeau à partir des ressources « terres » de l'exploitation.

Pour appréhender les décisions des éleveurs concernant la conduite du système fourrager, ce concept d'atelier paraît pertinent puisqu'il permet de mettre en évidence des décisions relatives à la gestion spécifique de l'atelier et des décisions permettant de coordonner l'utilisation des ressources (travail, terre, équipement, ...) entre les différents ateliers. De plus, parce qu'au sein des ateliers les objets gérés par l'éleveur correspondent à des groupes d'animaux ou de parcelles ayant la même fonction (pâturage, production de fourrages stockés,...) et qu'ils sont déterminés par la saisonnalité des processus biologiques, le concept d'atelier permet d'articuler les dimensions spatiales et temporelles de la prise de décision.

Nous allons maintenant décrire les règles de décision régissant ces ateliers.

Tableau 1 : Les différents types d'ateliers du système fourrager, exemples d'objectifs, de tâches et de savoirs d'après Coléno (1997)

		<i>Objectif de production</i>	<i>Tâches</i>	<i>Savoir-faire</i>	<i>Savoir comprendre</i>
	Atelier troupeau	Produire du lait ou de la viande	Inséminer, traire...	Modalités d'exécution de l'insémination	Indicateurs portant sur l'état du troupeau (poids vif...) et règles d'action
Ateliers fourragers	Atelier pâturage	Créer sur une longue période une structure de la prairie apte à satisfaire l'objectif de production	Fertiliser, changer les animaux de parcelle...	Modalités du changement de parcelle	Indicateurs portant sur l'état des prairies (hauteur d'herbe...) et règle d'action (mise à l'herbe)
	Atelier stocks	Créer une biomasse et la récolter entièrement au moment de la fauche	Fertiliser, faucher, récolter...	Modalités d'exécution de la fauche	Indicateurs portant sur l'état des prés de fauche (stade de l'herbe...) et règles d'action

3.3 Règles de dimensionnement, coordination et ordonnancement

Coléno et Duru (1998) décrivent les règles permettant la conduite et la coordination des différents ateliers précédemment définis. Il s'agit de règles de dimensionnement, d'ordonnancement et de coordination.

Le dimensionnement d'un atelier correspond à la quantité de ressource (travail, surface...) affectée à cet atelier, sa période calendaire ou bien la fraction du cycle de reproduction des animaux ainsi que sa durée. Les règles de dimensionnement visent donc à fixer dans le calendrier, les dates de début et de fin des ateliers et la quantité de ressource à affecter durant cet intervalle de temps.

L'ordonnancement correspond à l'organisation de la succession des tâches au sein de l'atelier. Les règles d'ordonnancement régissent donc le processus de production de l'atelier.

Les coordinations permettent d'éviter des excès ou des manques de ressources ainsi que les éventuelles compétitions entre ateliers pour une même ressource. Les règles de coordination ont pour but de gérer les interfaces et transitions entre ateliers. Elles régissent les enchaînements d'utilisation des différentes ressources fourragères au cours du temps à l'échelle des saisons mais aussi des campagnes. Elles correspondent donc aux régulations prévues par saison (mobilisation des surfaces tampons, distribution de stocks,...) et à la prise en compte de l'état des stocks provenant de l'année précédente.

Les deux premiers types de règles relèvent de la gestion autonome de l'atelier alors que les règles de coordination se raisonnent entre ateliers. Cependant, la mise en œuvre des règles de coordination contribue au dimensionnement et à l'ordonnancement effectifs des différents ateliers.

3.4 Planification et pilotage

Les ateliers sont soumis aux aléas, obéissent à des temporalités différentes, et mobilisent à certains moments de la campagne une même ressource. Pour faire face à cette complexité l'éleveur planifie ses activités d'élevage. Durant cette planification les objectifs et les

ressources assignées à chaque atelier sont déterminés. Au cours du pilotage ces ressources sont attribuées de façon définitive.

L'existence d'une planification des activités d'élevage par l'éleveur est justifiée par leur caractère récurrent et cyclique. En effet, ce caractère récurrent et cyclique contribue au développement d'un processus d'apprentissage qui permet à l'éleveur de planifier son activité (Aubry *et al.*, 1998). La planification définit des plages de contraintes (Hémidy *et al.*, 1993) pour la mise en œuvre des ateliers de production. Elle correspond également à la définition d'un programme d'action préalable à la gestion courante (pour Coléno, 1997, ce programme d'action correspond à l'affectation de surfaces aux ateliers). Les contraintes sont déclinées à partir des orientations stratégiques que l'éleveur s'oblige à respecter.

La planification définit à la fois les décisions générales correspondant au déroulement souhaité des opérations et les solutions de rechange en cas de perturbation (Chatelin *et al.*, 1993 ; Fleury *et al.*, 1996 ; Duru *et al.*, 1998). Lors de la planification, l'éleveur anticipe donc les effets des aléas pour définir ces solutions de rechange.

Les solutions de rechange (surfaces de sécurité, distribution de stocks au pâturage...) sont définies pour faire face à l'incertitude. Selon Sébillotte et Soler (1990), le passé récent fournit une grille de lecture du champ des futurs possibles. L'attention de l'agriculteur se fixe autour de quelques événements, retenant les cas extrêmes (soit le meilleur, soit le pire). Les décisions retenues lui permettent soit de se préparer à saisir d'éventuelles opportunités, soit de se prémunir de situations jugées particulièrement défavorables (Sébillotte et Soler, 1990). Dans la détermination du champ des futurs possibles, les aléas climatiques sont déterminants. Ces aléas correspondent à l'occurrence de phénomènes dont la probabilité est contenue dans une gamme de variation reconnue à l'avance par celui-ci. Eldin (1989) souligne la part importante de la subjectivité dans la perception et l'évaluation de nombreux aléas. Les réactions des agriculteurs face aux aléas dépendent ainsi de la perception qu'ils en ont. D'un éleveur à l'autre, les solutions de rechange et les décisions générales sont donc différentes en fonctions des aléas climatiques pris pour référence par l'éleveur.

Dans le cadre plus précis du dimensionnement, la planification correspond à la détermination par l'éleveur des surfaces de base (Bellon *et al.*, 1999) qui seront affectées de façon prioritaire aux différents ateliers. Ces surfaces de base correspondent aux « décisions générales »

définies en fonction du déroulement souhaité des opérations. Des surfaces de sécurité (Bellon *et al.*, 1999 ; Guérin et Bellon, 1990) ou surfaces tampons, sont également prévues. Elles correspondent aux « solutions de rechange » à mobiliser en cas de perturbation. Ce sont des parcelles sans pré-affectation, conçues pour s'adapter aux conditions particulières de l'année. Elles relèvent plus spécifiquement des « coordinations » définies dans la section précédente et dont la mise en œuvre pourra donner lieu à l'ajustement du dimensionnement.

Lors de la planification du dimensionnement, l'éleveur détermine également un calendrier alimentaire prévisionnel et des moments-clefs durant lesquels il y aura évaluation du déroulement des opérations et de leur adéquation avec la planification. Coléno et Duru (1998) décrivent à ce propos le rôle important joué par la date de mise à l'herbe dans la coordination entre les ateliers de production.

La planification de l'ordonnancement correspond à la détermination d'un ordre prévisionnel d'exécution des opérations techniques (décisions d'ordre général) déterminé en fonction d'un champ de contraintes. Elle prévoit aussi des adaptations possibles de cet ordre (les solutions de rechange) qui seront mises en œuvre en fonction des conditions de l'année.

Le pilotage assure la mise en œuvre effective de la planification en cours de campagne c'est à dire à l'application des règles générales et des solutions de rechange si nécessaire. Il est aussi appelé « pilotage opérationnel » correspondant aux décisions courantes en matière de gestion technique (Chatelin *et al.*, 1993). Les résultats issus de ce pilotage peuvent entraîner une modification de la stratégie (Hémidy *et al.*, 1993). Certains auteurs proposent ainsi le concept de « pilotage stratégique » qui vise à s'assurer de l'adéquation entre la stratégie et la gestion courante (Attonaty et Soler, 1992)..

Le pilotage opérationnel donne lieu à des ajustements. Ceux-ci correspondent à la mise en œuvre en fonction des aléas, des alternatives planifiées (les solutions de rechanges). Ces ajustements interviennent à certains moments-clés de la campagne. Durant ces moments-clés il peut donc y avoir ajustement de la répartition des ressources voire des objectifs. Ces moments-clés sont des « rendez-vous » que l'éleveur se fixe durant la campagne pour s'assurer de l'adéquation entre la planification et le déroulement des événements. Ils se situent à des périodes de confluence des résultats et des anticipations relatifs au fonctionnement des différents ateliers (Hémidy *et al.*, 1993). Durant ces moments, la non satisfaction d'états à atteindre au niveau des ressources fourragères ou des lots d'animaux, remet en cause (ou rend impossible) les performances, voire la reproductibilité du système (Duru *et al.*, 1988b).

Ces moments-clés vont donner lieu à la recherche d'information, leur traitement puis le choix des modalités pratiques d'intervention (Chatelin *et al.*, 1993).

Lors du pilotage du dimensionnement et de l'ordonnancement l'éleveur va ainsi décider de l'attribution effective des surfaces tampons (Coléno, 1997) ainsi que la mise en œuvre ou non des adaptations de l'ordre prévisionnel. Ce pilotage contribue donc à ajuster le dimensionnement ou l'ordonnancement en fonction des régulations mobilisées par l'éleveur.

Conclusion

Le système fourrager est l'échelle pertinente pour analyser la sensibilité des exploitations aux aléas climatiques. Celle-ci est définie comme la variabilité des résultats de production entre années. Au sein des régulations mises en œuvre par l'éleveur pour limiter la variabilité des résultats de production entre années, la mise à profit des ressources de l'exploitation est spécifique des systèmes d'élevage extensifs. Le corps de règles de décision régissant la conduite du système fourrager et par conséquent l'utilisation du territoire d'exploitation peut être décrit par les règles de dimensionnement, ordonnancement et coordination d'ateliers. Elles relèvent pour certaines de la planification, c'est à dire de la prévision des décisions générales et des régulations à mettre en œuvre en cas d'aléas. D'autres relèvent du pilotage, c'est à dire de la mise en œuvre en cours de campagne du plan qui compte tenu de la mobilisation des régulations va conduire à ajuster le dimensionnement et l'ordonnancement.

Chapitre 2 – Présentation de la problématique

Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons donné une définition générale de la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Nous avons ensuite défini l'utilisation du territoire d'exploitation et mentionné ses principaux déterminants. Nous avons enfin caractérisé la nature des règles régissant la conduite du système fourrager et par conséquent l'utilisation du territoire d'exploitation. Compte tenu de ces définitions générales, nous allons dans ce chapitre présenter l'objet plus précis de notre étude et les simplifications nous permettant de nous focaliser sur cet objet (section 1). Nous présentons ensuite la question de recherche et les hypothèses à tester pour y répondre (section 2). Dans la section 3, la démarche générale permettant de tester ces hypothèses sera détaillée.

1 Objet d'étude et simplifications

La décomposition du système fourrager en ateliers et la caractérisation du corps de règles les régissant facilite l'analyse du processus décisionnel (section 3.2 du chapitre 1). Cependant plusieurs auteurs soulignent le fossé existant entre l'analyse des décisions par les scientifiques et l'activité décisionnelle de l'éleveur. Les décisions des éleveurs ne sont en effet que partiellement déterministes et modélisable. Le processus de décision est en effet interne (McCown, 2002a ; Cros *et al.*, 2004) donc inaccessible à l'observateur. Seule l'expérience permet au décideur de juger la situation et voir ce qui convient..

Néanmoins à travers cette tentative de structuration du processus de décision de l'agriculteur nous cherchons à externaliser cette connaissance implicite (Aubry *et al.*, 1998).

Plus que le processus décisionnel dans toute sa complexité, nous nous intéressons plus particulièrement à la stratégie d'utilisation du territoire de l'exploitation de l'éleveur. Par stratégie nous entendons l'ensemble des règles élaborées par l'éleveur pour lui permettre d'atteindre un objectif fixé au système fourrager (Hemidy *et al.*, 1993 ; Girard et Hubert, 1999). Dans cette recherche, l'objectif à atteindre est précisément la limitation de la sensibilité aux aléas climatiques qui nous l'avons vu est une contrainte majeure dans la gestion du

système fourrager. Nous avons vu également qu'il existait plusieurs possibilités permettant de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques (section 2.2 du chapitre 1). Mais au sein de ces différentes possibilités, nous focalisons notre recherche sur l'utilisation du territoire.

Le territoire utilisé est divers. Cette diversité résulte à la fois de l'hétérogénéité intra et inter-parcellaire. Les entités gérées au sein de l'atelier étant les parcelles, la diversité du territoire à laquelle nous faisons référence renvoie à la variabilité inter-parcellaire de végétations, exposition, profondeur ou texture ou toute autre caractéristique conférant à la parcelle un rôle tampon par les décalages de production, d'accessibilité, de stade phénologique qu'elle engendre et pouvant être mis à profit par l'éleveur. Toutefois, compte tenu du rôle important mentionné par les auteurs de la diversité inter-parcellaire de distance, dimension ou forme, ces caractéristiques sont également considérées. La diversité du territoire d'exploitation comprend donc une composante *en interaction avec le climat* et une composante *sans interaction* avec celui-ci. Dans la suite de la thèse, nous faisons implicitement référence à la diversité en interaction avec le climat. Lorsqu'une confusion est possible, nous précisons si la diversité est en interaction ou non avec le climat.

Se focaliser sur l'utilisation du territoire comme moyen de limitation de la sensibilité aux aléas climatiques implique un certain nombre de choix :

1. Nous ne considérons pas le recours à des ressources externes à l'exploitation (fertilisants, achats de foin, concentrés...)

Dans la définition initiale de la sensibilité aux aléas climatiques (section 1.3 du chapitre 1), l'éleveur pour la limiter pouvait recourir à des ressources externes ou à une organisation différente des ressources internes de l'exploitation. Nous opérons une restriction de la définition initiale et ne considérons pas ce recours à des ressources externes qui est plutôt spécifique des systèmes d'élevage intensifs. Nous nous focalisons alors sur l'organisation des ressources internes de l'exploitation et plus spécifiquement sur l'utilisation de la diversité du territoire.

2. Les ateliers fourragers sont étudiés en priorité

Dans notre recherche nous nous intéressons principalement aux ateliers fourragers au détriment des ateliers animaux car nous n'étudions pas la possibilité qu'a l'éleveur de mobiliser la tolérance des animaux ou la diversité des stades physiologiques pour limiter la sensibilité aux aléas climatiques. En d'autres termes, la réorganisation interne des ressources animales n'est pas considérée (section 1.3 du chapitre 1). Les ateliers animaux ne sont considérés qu'à travers la demande qu'ils imposent aux ateliers fourragers. En effet, les ateliers animaux traduisent les objectifs de production assignés par l'éleveur (niveau de production laitière...), en besoins en ressources alimentaires qu'ils envoient aux ateliers fourragers (Coléno, 1997).

3. Dans le cadre du dimensionnement d'atelier, la ressource considérée est la surface

Les autres ressources (main d'œuvre, équipement), qui jouent un rôle certain dans le dimensionnement des ateliers, sont considérées comme non limitantes.

Quelques aménagements du concept de dimensionnement doivent en outre être réalisés pour rendre compte de la diversité existant au sein de l'exploitation de cette ressource « surface ». En gestion de production, le terme de dimensionnement fait référence à une ressource homogène. Dans le modèle de dimensionnement proposé par Coléno (1997), les parcelles sont à ce titre homogènes. Ce concept de dimensionnement doit donc être élargi pour prendre en compte une ressource hétérogène. On s'intéresse alors à la manière dont la diversité du territoire est prise en compte dans les règles de dimensionnement des ateliers fourragers, et notamment dans les décisions d'affectation des surfaces à l'un ou l'autre des ateliers.

4. Au sein des règles d'ordonnancement, l'ordre d'utilisation des parcelles est étudié en priorité

Dans le cadre de l'atelier pâturage, la fertilisation ainsi que l'ordre d'utilisation des parcelles permettent de réguler l'offre au pâturage. L'ordre d'utilisation des parcelles demande une maîtrise particulière en ce qui concerne par exemple la hauteur d'herbe résiduelle après pâturage compte tenu de l'incidence sur la dynamique et la qualité de la repousse (Duru et Ducroq, 2002). Dans le cadre des ateliers de production de fourrages stockés, l'ordre d'utilisation des parcelles permet de contrôler la qualité du fourrage récolté (Duru et Colombani, 1998). Bien que la définition des règles d'ordonnancement fasse référence à l'organisation de plusieurs tâches, dans notre travail nous nous intéressons davantage à l'organisation d'une tâche en particulier (l'ordre d'utilisation des parcelles) et à la manière

dont la diversité du territoire est susceptible d'y jouer un rôle déterminant. Nous n'étudions pas les ajustements possibles des apports de fertilisants en fonction des aléas climatiques car leur étude relève d'une logique qui consiste à mobiliser des intrants face aux aléas climatiques, et que nous ne cherchons pas à caractériser.

Ainsi, par rapport aux définitions générales présentées dans le chapitre 1, nous avons dû opérer plusieurs restrictions afin de nous focaliser sur l'utilisation du territoire au sein des différents ateliers fourragers. Cette utilisation du territoire correspond aux modes d'affectation (via le corps de règles défini dans la section 1.3) de parcelles ayant des caractéristiques hétérogènes. Les ateliers animaux, les autres déterminants de l'utilisation du territoire mais aussi le recours à des ressources externes à l'exploitation sont considérés comme constants ou non contraignants. Ces restrictions permettent de concentrer la recherche sur ce qui semble le plus pertinent compte tenu de l'objet d'étude : l'utilisation du territoire et de sa diversité comme possibilité de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Nous formulons dans la section qui suit la question de recherche.

2 Question de recherche et hypothèses de travail

2.1 Question de recherche

Dans cette recherche, la sensibilité du système fourrager est à la fois déterminant et produit des pratiques d'affectation. Déterminant dans le sens où l'objectif de la stratégie d'utilisation du territoire est de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Produit, car la mise en œuvre de cette stratégie se traduit par une sensibilité effective.

La thèse défendue est que l'éleveur peut réduire la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques en tenant compte de la diversité de son territoire.

Dans un contexte socio-économique où certaines mesures des cahiers des charges sont susceptibles d'augmenter la sensibilité aux aléas climatiques nous cherchons à étudier comment par la prise en compte de la diversité du territoire de l'exploitation lors des décisions concernant son utilisation, l'éleveur peut limiter cette sensibilité. Celle-ci se traduit au sein du système fourrager par une variabilité des résultats de production et plus précisément de l'offre fourragère entre années. Evaluer la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques nécessite donc un suivi sur plusieurs années. Le recours à la modélisation

permet de tester rapidement les résultats de production d'une large gamme d'alternatives sous une large gamme de conditions climatiques (Hansen, 2002). L'enjeu majeur de ce travail est donc de construire un modèle permettant d'étudier la relation entre l'utilisation du territoire, sa diversité et la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Il ne s'agit pas de construire un modèle d'aide à la décision mais un modèle de recherche permettant d'étudier cette relation et par conséquent approfondir notre connaissance du système fourrager.

Pour défendre cette thèse, nous réalisons donc par le biais de la modélisation, une étude diachronique de systèmes fourragers différents par leur stratégie d'utilisation du territoire. Nous comparons alors pour ces systèmes la variation de l'utilisation du territoire et les résultats de production associés sur une série d'années climatiques. Pour les systèmes que nous nous proposons d'étudier, nous supposons que si l'utilisation effective du territoire peut changer d'une année à l'autre en fonction des aléas climatiques, la stratégie à l'origine de cette utilisation du territoire est unique. En d'autres termes, nous ne tenons pas compte du pilotage stratégique (section 3.4 du chapitre 1) qui peut engendrer une remise en cause de la stratégie.

Le contexte de l'adoption des cahiers des charges constitue une voie d'entrée à la compréhension de stratégies d'utilisation du territoire mises en œuvre pour limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Nous étudions des systèmes se distinguant par le fait d'avoir adopté ou non ces mesures des cahiers des charges. Non pas pour étudier des logiques de transformation de systèmes fourragers (telles que le passage de l'ensilage au foin séché au sol lié à l'adoption des cahiers des charges AOC Cantal et Saint-Nectaire).. Mais parce que nous supposons que les éleveurs ayant adopté de telles mesures, ont des sensibilités structurelles plus importantes entraînant des modalités d'utilisation du territoire différentes de ceux ne les ayant pas adoptés.

Pour étudier cette thèse, deux hypothèses seront testées.

2.2 Hypothèses de travail

L'utilisation du territoire définie comme l'ensemble des pratiques d'affectation se déroulant à l'échelle d'une campagne, est le produit des règles de planification et de pilotage mobilisées par l'éleveur. En d'autres termes, l'utilisation du territoire est prévue par l'éleveur en fonction de son plan mais n'acquiert de réalité matérielle que lors du pilotage en cours de campagne. Il

importe donc de comprendre comment l'éleveur planifie le dimensionnement, l'ordonnancement et les coordinations entre ateliers de production. Lors du pilotage, la mise en œuvre de cette planification et notamment de ses coordinations aboutit à un dimensionnement et un ordonnancement effectifs. Ce dimensionnement et cet ordonnancement sont les deux composantes de l'utilisation du territoire. Nos hypothèses portent donc sur ces composantes afin d'étudier le rôle joué par chacune d'entre elles pour limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques.

2.2.1 Hypothèse 1 : dimensionnement et diversité du territoire

Dans leurs travaux sur le dimensionnement d'ateliers, Coléno *et al.*, (2002) montrent qu'un surdimensionnement (stock d'herbe trop important par rapport à la consommation maximale du troupeau) de l'atelier « production de fourrages stockés » permet de prévenir des ruptures d'alimentation en cas d'aléas climatiques. Cependant il génère des coûts de récolte et de stockage et nécessite de la place et n'est pas forcément compatible avec le travail et les équipements (nombre de jours nécessaires par hectares récoltés). Au contraire un sous dimensionnement (stock d'herbe trop faible par rapport à la consommation des animaux) génère des ruptures d'alimentation durant les années à problème.

Pour le pâturage de printemps un surdimensionnement met à l'abri de rupture mais génère très rapidement des problèmes de qualité de l'offert pour les animaux en production. Un sous dimensionnement génère des ruptures les années à faible croissance ou difficulté de récolte et peut même conduire à un cercle vicieux si l'intensité de pâturage est augmentée (ralentissement de la vitesse de croissance lorsqu'on se situe en période de plein printemps alors qu'il y a déjà manque d'herbe).

Coléno *et al.* (2002) mettent en évidence le rôle joué par les ajustements des surfaces destinées à l'ensilage d'herbe ou de maïs pour éviter les ruptures alimentaires ou les reports de fourrages conservés importants. Ces ajustements sont permis par les surfaces tampons et la révision du plan lors du pilotage. Etudier comment les règles de dimensionnement peuvent permettre de limiter la sensibilité aux aléas climatiques nécessite donc d'étudier les modalités d'ajustements mises en œuvre par les éleveurs.

Mais le dimensionnement tel que nous l'avons défini ne concerne pas simplement l'affectation d'une surface homogène. Il porte sur des parcelles ayant des caractéristiques différentes. Ces caractéristiques se traduisent à l'échelle du territoire d'exploitation, par une diversité de la production de biomasse, de la précocité de la pousse de l'herbe ou de

l'accessibilité. La mise à profit de la diversité du territoire peut permettre de jouer sur le calendrier des différents ateliers ou leur niveau de production. Ainsi par exemple, affecter les parcelles les mieux exposées à l'atelier ensilage peut permettre d'avancer les dates de récolte ce qui par conséquent va influencer sur sa durée. Affecter les parcelles les plus productives à l'atelier foin ventilé peut permettre de diminuer la surface nécessaire pour atteindre l'objectif de production fixé. La surface complémentaire pourra alors être affectée à un autre atelier, celui pour lequel la production est insuffisante. Les ruptures alimentaires se trouvent alors limitées. Ainsi, la mise à profit de la diversité peut être associée aux ajustements, dont le rôle central a été souligné par Coléno *et al.*(2002), ou simplement à la planification des surfaces de base.

L'hypothèse que nous nous proposons de tester est la suivante :

La prise en compte de la diversité du territoire dans les règles de dimensionnement permet de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques, cette prise en compte pouvant relever de la planification ou des ajustements.

2.2.2 Hypothèse 2 : ordonnancement et diversité du territoire

Pour limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques l'éleveur a également la possibilité d'adapter au sein de chaque atelier, l'ordre d'utilisation des parcelles à la diversité du territoire de l'exploitation, cette adaptation pouvant relever de la planification ou des ajustements.

La première hypothèse concernait l'étude du rôle de la diversité du territoire lors de l'attribution des parcelles aux différents ateliers. Cette deuxième hypothèse vise à étudier son rôle dans l'organisation des activités au sein de l'atelier.

Pour la production de fourrages stockés : l'éleveur peut par exemple, plutôt que de choisir de façon aléatoire un ordre de fauche, l'adapter aux différences d'état de végétation inter-parcellaires de façon à finir plus tôt le chantier de récolte et permettre une mise à disposition plus précoce des repousses pour le pâturage estival ou la récolte de regain. De la même manière pour le pâturage, tenir compte de la diversité relativement à la portance permet de sortir plus tôt les lots d'animaux si la portance est une contrainte pour la mise à l'herbe ; pâturer en premier les parcelles séchantes en été permet de valoriser l'herbe qui serait probablement perdue si ces parcelles étaient pâturées en dernier.

3 Démarche générale

Pour tester les deux hypothèses de travail, la démarche générale consiste à évaluer la sensibilité aux aléas climatiques de systèmes fourragers prenant en compte la diversité du territoire de l'exploitation dans les règles de dimensionnement et d'ordonnancement. Cette sensibilité est comparée à celle de systèmes fourragers ne mettant pas à profit cette diversité alors qu'elle existe. Deux voies sont possibles pour l'évaluation sur plusieurs années et la comparaison de la sensibilité aux aléas climatiques de ces différents systèmes :

- leur suivi durant plusieurs années ;
- construire un modèle permettant des simulations pluriannuelles de ces systèmes.

Compte tenu du temps limité de la thèse c'est la deuxième option que nous avons privilégiée. Cependant pour que le modèle soit suffisamment réaliste et robuste, il doit reposer sur une identification des indicateurs et déterminants des décisions prises par l'éleveur (Hansen, 2002 ; Nelson *et al.*, 2002). Une phase empirique est donc nécessaire pour renseigner l'aspect décisionnel du modèle. A cette composante décisionnelle est articulée une composante biophysique. Cette dernière est constituée principalement d'un modèle de croissance de l'herbe choisi au sein de la bibliographie afin de prendre en compte les effets du climat et de la diversité du territoire. Notre démarche comprend donc trois étapes :

- l'identification de façon empirique de différentes stratégies d'utilisation du territoire (section 3.1);
- la construction du modèle (section 3.2);
- la simulation et l'évaluation des différentes stratégies pour leur sensibilité aux aléas climatiques (section 3.3).

3.1 Etude empirique des stratégies d'utilisation du territoire

Pour des élevages ayant adopté ou non des mesures de cahiers des charges susceptibles d'augmenter la sensibilité de leur système fourrager aux aléas climatiques, les stratégies d'utilisation du territoire sont supposées différentes.

Cette première étape consiste donc à analyser à partir d'enquêtes et suivis les règles de décision assurant la conduite de ces systèmes fourragers et par conséquent leur utilisation du territoire.

Dans cette analyse un intérêt particulier est mis sur les modes de prise en compte des facteurs climat et diversité du territoire.

Les pratiques mises en œuvre en cours d'année par les éleveurs sont susceptibles d'être dépendantes des aléas de la campagne et donc de relever du cas particulier. Nous mettons l'accent sur la planification de la campagne car elle favorise l'identification d'un schéma général. Il rend les pratiques partiellement prédictibles (Aubry *et al.*, 1998) et permet l'élaboration de stratégies virtuelles à simuler sur plusieurs années.

Cette étape contribue également à préciser quelles simplifications des résultats observés peuvent être réalisées si on admet qu'un modèle se définit comme étant une représentation toujours simplifiée du réel (Coquillard et Hill, 1997 ; Le Bris et Duru, 1988 ; van Ittersum et Donatelli, 2003).

3.2 Construction d'un modèle du système fourrager

La phase d'élaboration du modèle nécessite plusieurs choix méthodologiques préalables : le pas de temps, le niveau de complexité et les techniques de modélisation les mieux adaptées à l'étude. Le modèle articule un sous-modèle décisionnel élaboré à partir de la phase empirique à un sous-modèle biotechnique. En enjeu important de cette étape est de choisir au sein de la bibliographie un modèle de croissance de l'herbe capable, soit sous sa forme originale, soit après adaptations, de simuler les effets des décisions, des aléas climatiques et de la diversité du territoire d'exploitation.

Cette étape nécessite également une validation du modèle afin de s'assurer de son réalisme dans un cadre donné.

3.3 Simulation et évaluation de stratégies d'utilisation du territoire pour leur sensibilité aux aléas climatiques

Dans cette recherche nous souhaitons étudier une relation entre trois composantes : la diversité du territoire, la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques, l'utilisation du territoire. La sensibilité du système fourrager correspond à une variable « dépendante » (censée subir l'action de facteurs) alors que l'utilisation du territoire et la diversité constituent deux variables « indépendantes » (censées influencer sur la première). C'est à partir de cette variable dépendante que sont évaluées les deux variables indépendantes. Pour différents aléas

climatiques nous testons donc par simulation plusieurs modalités des variables indépendantes :

- plusieurs stratégies d'utilisation du territoire identifiées lors de la première étape ;
- des territoires d'exploitation présentant des diversités différentes afin d'évaluer la relation entre la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques et la plus ou moins grande importance de la diversité du territoire d'exploitation.

Dans chacun des cas de figure, la sensibilité des systèmes fourragers aux aléas climatiques est évaluée à l'aide d'indicateurs synthétiques issus des sorties des simulations. Un enjeu important consiste donc à déterminer des indicateurs pertinents d'évaluation de cette sensibilité.

La validation ou non des hypothèses provient pour un climat donné, de la confrontation entre la sensibilité évaluée des différentes stratégies et leur niveau de prise en compte de la diversité du territoire.

Conclusion de la première partie

Plusieurs auteurs mentionnent l'utilisation du territoire comme un moyen de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Dans le cadre de cette recherche nous souhaitons mieux caractériser cette possibilité notamment lorsque le territoire d'exploitation est hétérogène. Le concept d'atelier de production emprunté aux sciences de gestion fournit une grille de lecture possible du système fourrager. Cette grille de lecture, même si elle présente certaines limites, favorise l'analyse des décisions de l'éleveur et permet de structurer notre démarche de travail. Ainsi les concepts de dimensionnement et d'ordonnancement régissant la conduite des ateliers, sont vus comme les deux composantes de l'utilisation du territoire. Nos hypothèses de travail portent ainsi sur ces deux composantes.

Dans cette recherche, la modélisation joue un rôle central. La démarche générale de travail consiste donc à mener une étude empirique afin de garantir le réalisme des stratégies d'utilisation du territoire comparées, à construire ce modèle puis à réaliser des simulations. Dans les chapitres suivants nous retraçons l'ensemble de cette démarche. Nous détaillons pour chaque étape de la démarche la méthodologie et les principaux résultats.

**Deuxième Partie : Identification empirique de différentes
stratégies d'utilisation du territoire**

Introduction

Pour tester les hypothèses nous avons structuré notre démarche de travail en trois grandes étapes (section 3 du chapitre 2). Dans cette partie nous présentons la première des trois étapes à savoir l'identification empirique de différentes stratégies d'utilisation du territoire. Cette étape repose sur l'étude d'exploitations d'élevages ayant adopté ou non des cahiers des charges susceptibles de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. La description pour ces différents systèmes des règles régissant la conduite de leurs différents ateliers fourragers doit permettre de construire des stratégies virtuelles d'utilisation du territoire. Ces stratégies doivent permettre de tester par simulation l'effet d'une prise en compte de la diversité du territoire dans les règles de dimensionnement (hypothèse 1) ou d'ordonnancement (hypothèse 2) sur la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Cette étape empirique repose sur un suivi d'exploitations. Comme son nom l'indique, il consiste à suivre le déroulement d'une campagne fourragère, la campagne 2002 en l'occurrence. Pour le suivi nous ne cherchons pas une représentation exhaustive de l'ensemble des exploitations d'Auvergne mais l'analyse approfondie d'un petit nombre d'entre elles afin d'en extraire des règles de décision réalistes pour les stratégies à construire. Une fois les règles identifiées on peut élaborer des stratégies stylisées afin de tester les hypothèses. Ces stratégies vont constituer la composante décisionnelle du modèle à construire. Avant ce suivi, une phase exploratoire a été menée afin de préparer sa mise place grâce à une première identification des déterminants de l'utilisation du territoire de différents systèmes fourragers. Dans le chapitre 3 nous présentons la méthodologie et les principaux résultats de la phase exploratoire puis dans le chapitre 4 ceux du suivi d'exploitation.

Chapitre 3 - Les enquêtes exploratoires

Introduction

Plusieurs auteurs citent la nécessité avant la phase d'enquête proprement dite ou de suivi, de mener une phase préparatoire que certains nomment « enquête exploratoire » (Coléno, 1997 ; Blanchet et Gotman, 2001) ou « pré-enquête » (Muchielli, 1990). Elle peut consister à discuter avec des experts, reposer sur une étude de la bibliographie ou encore sur des entretiens auprès d'individus de la population concernée par le suivi. Nous avons ainsi choisi cette dernière option et mené des enquêtes exploratoires auprès de 21 éleveurs durant l'hiver 2002. L'objectif était de se familiariser avec les différentes logiques d'élevage et d'évaluer les modalités de mise en place d'un suivi d'élevage. Grâce à une première identification des déterminants des pratiques d'affectation, cette phase de pré-enquête devait permettre de déterminer les informations pertinentes à approfondir lors du suivi et les méthodes de collecte de ces informations. Après avoir décrit la méthodologie employée pour cette première étape du travail (section 1) nous présenterons ses principaux résultats (section 2).

1 Méthode

1.1 Zone d'étude

En Auvergne le référentiel fourrager (Réseaux d'élevage, 2001a) distingue 5 zones agro-climatiques recouvrant des caractéristiques pédoclimatiques homogènes :

- la zone « Volcanique tout herbe » : elle comprend une région haute entre 1000 et 1200 m d'altitude et une région de moyenne altitude (800 à 1000m) plus intensive. Les sols à dominante volcanique (riches en phosphates, sels, potassium) et les précipitations abondantes et régulières (1350 mm en moyenne par an) assurent une pousse d'herbe continue durant la saison de pâturage. Cependant, la durée d'hivernage est longue. Les surfaces d'exploitation sont en majeure partie composées de prairies permanentes ;
- la zone « Volcanique labourée » : l'altitude moyenne se situe autour de 1000m. La pluviométrie est plus faible (800 mm) que dans la zone précédente, et mal répartie, ce qui entraîne un déficit fourrager estival susceptible de causer des ruptures de

l'alimentation au pâturage à cette période. Les sols ont un bon potentiel, le relief est peu accidenté et une grande partie des parcelles est mécanisable. Ceci permet entre autre, la culture de céréales de montagne et de lentilles en rotation avec des prairies temporaires ;

- la zone « Granitique d'altitude » : l'altitude est comprise entre 800 et 1200 m, la pluviométrie (900 à 1200 mm) est correcte, mais les sols filtrants (formés sur arène granitique) et de faible profondeur, ont une faible réserve en eau ; aussi il y a souvent déficit d'herbe en été ;
- la « Zone intermédiaire à maïs possible » : l'altitude est souvent inférieure à 800 m et la pluviométrie est faible (900 mm). Les sols (granitiques, métamorphiques ou sédimentaires) sont séchants ce qui entraîne un déficit marqué d'herbe en été ;
- la « Zone favorable au maïs » : l'altitude inférieure à 700 m permet la culture du maïs avec de bons rendements. La pluviométrie moyenne est de 1300 mm par an, mais les sols formés sur granite ou schiste ont une faible capacité de rétention d'eau.

Pour cette phase d'enquêtes exploratoire, les éleveurs étaient en majorité localisés dans la zone volcanique tout herbe qui correspond à la zone la plus concernée par le contexte de révision des cahiers des charges AOC. Un des éleveurs se situait dans la zone volcanique labourée et deux en zone granitique d'altitude.

1.2 Echantillon

Nous avons cherché à mener des enquêtes sur des exploitations d'élevage se distinguant par le fait d'avoir adopté ou non des mesures de cahiers des charges pouvant affecter la sensibilité de leur système fourrager aux aléas climatiques. L'interdiction de l'ensilage et de l'enrubannage envisagée par la révision des cahiers des charges AOC est susceptible d'augmenter la sensibilité des systèmes fourragers. Les éleveurs sélectionnés pour cette pré-enquête se sont donc distingués par le type de chantier de récolte employé (tableau 2). Nous qualifions les différents systèmes fourragers enquêtés par leur mode dominant de conservation des fourrages. Nous avons ainsi étudié :

- 5 systèmes « foin séché au sol » (FS) ;
- 4 systèmes « foin ventilé » (FV) ;
- 5 systèmes « enrubannage » (Enr) ;

Tableau 2 : Données générales sur les éleveurs

Eleveur	Zone fourragère	Altitude (m)	Système fourrager	SAU (ha)	Quantité de lait par vache (l/an)	Chargement (UGB/ha)	Stabulation des vaches laitières	Non fauchable (%)	Fauché/fauchable
1	granitique d'altitude	960	FV	40	5028	1,27	libre	?	?
2	volcanique tout herbe	600	FV	40,5	5871	1,23	logette entravée	23	100
3	volcanique tout herbe	1060	FV	63,5	6000	0,9	libre	48	100
4	granitique d'altitude	1050	FV	85	4492	1,29	libre logette	8	52
5	volcanique tout herbe	1050	FS	70	4500	0,8	entravée	10	49
6	volcanique tout herbe	570	FS	60	6500	0,7	entravée	57	100
7	volcanique labouré	1020	FS	70	6200	0,86	entravée avec paille	0	57
8	volcanique tout herbe	1150	FS	38	6800	1,5	libre à logette	25	70
9	volcanique tout herbe	1180	FS	134	4600	0,6	entravée	60	100
10	volcanique tout herbe	730	Enr+FS	50	6200	1,17	entravée	8	52
11	volcanique tout herbe	830	Enr + FS	55	1600	0,96	entravée sur caillebotis	36	53
12	volcanique tout herbe	1020	Enr+FS	62	6200	1,29	entravée	?	?
13	volcanique tout herbe	1060	Enr+FS	60	4500	1,2	libre	40	100
14	volcanique tout herbe	900-1060	Enr+FS	145	6100	0,67	libre à logette	32	85
15	volcanique tout herbe	1120	E + FS	150	5000	0,79	libre à logette	50	100
16	volcanique tout herbe	1040	E+Enr+FS	104	5500	1,15	libre à logette	15	57
17	volcanique tout herbe	1060	E +FS	90	7500	1,1	libre sur caillebotis	10	60
18	volcanique tout herbe	830	E +FS	33	5500	1,5	entravée sur caillebotis	17	86
19	volcanique tout herbe	1025	E+FS	56	5200	1,5	entravée sur caillebotis	?	?
20	volcanique tout herbe	1060	E +FS	98	6000	1,15	libre	10	40
21	volcanique tout herbe	780	E +FS	110	5900	0,69	libre sur lisier	?	?

- 7 systèmes « ensilage » (E).

Dans un souci de simplification de la compréhension de l'utilisation du territoire et ultérieurement du travail de modélisation, il s'agit de systèmes d'élevage tout herbe ayant 100% de prairie naturelle, et spécialisés en production laitière pour nous affranchir de situations de rotations avec des cultures ou d'allotements complexes spécifiques des systèmes allaitants.

Cette phase de pré-enquête a été menée de janvier à mars 2002.

1.3 Informations recueillies

La méthode de collecte d'informations choisie est le questionnaire ouvert car il constitue un bon compromis entre le questionnaire fermé et l'entretien semi-directif (De Singly, 1992). Il permet notamment de recueillir le vocabulaire employé par les éleveurs. Pour cette phase d'enquêtes exploratoires menées durant l'hiver, le questionnaire a mis l'accent sur la planification de la campagne à venir. S'intéresser au prévisionnel plutôt qu'au « réalisé » facilite l'identification des règles de planification employées. Le questionnaire comportait trois rubriques :

- une rubrique générale qui a permis une description du système fourrager ;
- une description du territoire d'exploitation, de ses contraintes et de ses potentialités à l'aide d'un support de carte IGN (1/25000) pour pouvoir comprendre leurs poids dans les décisions ;
- une description projective de la campagne de fauche et de la campagne de pâture à venir avec une entrée par ateliers.

2 Principaux résultats des enquêtes exploratoires

Le dimensionnement et l'ordonnancement constituent les deux composantes de l'utilisation du territoire (section 2 du chapitre 2). Les enquêtes exploratoires permettent une première caractérisation du dimensionnement et de l'ordonnancement d'ateliers à travers l'identification :

- des principaux événements-clefs structurant la campagne et de la nature des parcelles affectées aux différents ateliers ;
- de l'ordre d'utilisation des parcelles au sein des ateliers.

Elles fournissent également des informations sur les régulations prévues par les éleveurs qui vont conduire durant la campagne à l'ajustement du dimensionnement ou de l'ordonnancement. Après avoir brièvement décrit les informations récoltées sur la diversité des territoires d'exploitation (section 2.1), nous présentons ces différents résultats (sections 2.2 et 2.3).

2.1 Variabilité spatiale

Bien que la caractérisation du territoire reste sommaire, elle met en évidence une diversité non négligeable du territoire d'exploitation des éleveurs. On constate par exemple des gradients d'altitude supérieurs à 100 m chez 11 des 21 éleveurs. La proportion de surface non fauchable varie de 8 à près de 60 % du territoire d'exploitation. La distance moyenne des parcelles au siège de l'exploitation est de 1,5 km avec un coefficient de variation de 1,05 qui indique une extrême variabilité inter-parcellaire.

A partir des fonds de carte IGN nous avons noté pour les exploitations présentant les gradients d'altitude les plus importants qu'en moyenne 44 % des parcelles sont exposées nord et/ou sud.

2.2 Déterminants de l'utilisation du territoire

2.2.1 La structuration temporelle de la campagne fourragère

L'alimentation des animaux est à base d'herbe pâturée, de la mise à l'herbe à la rentrée des animaux à l'étable, avec cependant une transition possible en début de campagne de pâturage et une complémentation durant l'été. La campagne de pâturage est finalement marquée par ces deux événements (mise à l'herbe et rentrée à l'étable) ainsi que par les périodes de récolte des fourrages. Pour ces événements-clefs, nous présentons dans la partie qui suit une synthèse des indicateurs de déclenchement cités par les éleveurs (ceux mobilisés pour la mise à l'herbe et la récolte figurent dans le tableau 3).

Tableau 3 : Nombre de fois où un critère donné a été cité comme indicateur de déclenchement de la mise à l'herbe et de la récolte

	Précipitations et/ou températures	Stocks hivernaux	Quantité d'herbe sur pied	Chaleurs	-	-	-
Mise à l'herbe	19	6	4	3	-	-	-

	Montaison	Epiaison	Quantité d'herbe	Séquence sans pluie de 3 jours	Séquence sans pluie de 4-5 jours	Séquence sans pluie de 7 jours	CUMA	
1 ^{ère} coupe	FS	-	3	2	1	2	2	-
	E, Enr, FV	6	7	1	12	3	-	3

2.2.1.1 La mise à l'herbe des vaches laitières

La mise à l'herbe a lieu entre fin mars début avril dans les zones de basse altitude (entre 600 et 960 m). Dans les zones d'altitude (entre 1000 et 1200 m) elle a lieu début mai. Ce décalage illustre l'influence de la quantité d'herbe sur pied dans les dates de mise à l'herbe bien que cet indicateur ne soit pas souvent cité.

Le principal indicateur cité pour la mise à l'herbe des animaux est « la météo » quel que soit le mode de conservation des fourrages. Les conditions requises pour la mise à l'herbe sont un temps suffisamment sec pour que les animaux ne détériorent pas les pâtures, et doux pour que l'acclimatation ne soit pas trop difficile. Les éleveurs évaluent la portance du sol et compte tenu des conditions climatiques (pluviométrie et températures), décident de sortir ou non les animaux. La mise à l'herbe a tendance à être le plus précoce possible (pour 15 éleveurs), dès que les conditions climatiques le permettent, de façon à freiner la croissance de l'herbe et gérer le risque de dépassement par l'herbe. Les éleveurs citent en effet une période de 2 à 3 semaines pendant laquelle la pousse de l'herbe est exponentielle, l'enjeu majeur de la première période de la campagne de pâturage est donc de maîtriser la pousse par une mise à l'herbe précoce.

La quantité de stocks dans la grange peut avoir une influence sur la date de mise à l'herbe mais de façon minime. Les lots d'animaux qui ne sont pas en production sont dans ce cas mis

à l'herbe plus tôt de façon à pouvoir réserver du stock pour les vaches laitières et assurer leur mise à l'herbe dans les conditions optimum. Dans le cas de stabulation entravée, la plus grande facilité de détection des chaleurs quand les vaches sont au pré, peut motiver la mise à l'herbe. Les éleveurs n'ont pas exprimé la possibilité de jouer sur les aptitudes des prairies pour pouvoir sortir les animaux plus tôt en cas de manque d'herbe ou de problème de portance puisque la ou les parcelles affectées à la mise à l'herbe semblent fortement prédéfinies par la proximité à l'étable. Le déprimage lorsqu'il est circonstanciel permet d'assurer cette mise à l'herbe précoce en réduisant le chargement si la pousse est insuffisante.

2.2.1.2 La première coupe

Pour la première coupe des fourrages, les indicateurs-clés sont dans les systèmes « foin ventilé », ou « enrubannage » le climat, exprimé par un certain nombre de jours sans pluie, et le stade de l'herbe. Ce nombre de jours sans pluie varie entre 2 et 4. Le stade visé est la « fin montaison ». Il en résulte que la coupe est un mois plus précoce que pour les systèmes « foin séché au sol ». Dans ces élevages, on observe un nombre de coupes élevé (3-4). Ce stade de coupe précoce correspond donc aussi à une volonté de réaliser plusieurs coupes.

Les dates de première coupe prennent en compte dans la mesure du possible les potentialités des parcelles. Leur précocité va influencer sur l'ordre de fauche des parcelles bien que pour des raisons d'organisation des activités cette précocité soit parfois maîtrisée par un déprimage. Cette adaptation des dates de coupe aux parcelles est particulièrement vraie dans les systèmes foin ventilé où la capacité de séchage en cellule limite le volume sécable par jour.

Dans les systèmes « ensilage » la coupe a lieu au stade « début épiaison ». 1 à 2 jours sans pluie (4 pour 1 éleveur) sont suffisants pour décider de récolter.

L'une des contraintes citées dans les systèmes « ensilage » est la dépendance pour les dates de fauche à la CUMA, puisque l'ensileuse peut être mobilisée sur d'autres chantiers. La récolte est néanmoins plus précoce que dans les systèmes « foin séché au sol ». L'adaptation des dates de fauche aux potentialités parcellaires est difficile dans les systèmes « ensilage » où toute la surface peut être récoltée le même jour.

Dans les indicateurs cités par les éleveurs des systèmes « foin séché au sol », il y a moins d'exigence vis-à-vis du stade de l'herbe, donc de la qualité. Le stade optimal pour une récolte

de qualité est en effet souvent dépassé lorsque les conditions climatiques sont réunies pour la première coupe. 4 à 7 jours sans pluie sont nécessaires pour le séchage au sol. L'indicateur déclenchant la récolte est chez certains éleveurs la biomasse sur pied.

2.2.1.3 La récolte des regains

Pour cette récolte, les facteurs-clés sont la quantité d'herbe sur pied et une séquence sans pluie suffisante, mais généralement les températures étant plus élevées et les jours longs, la contrainte climatique est moins importante.

2.2.1.4 Le pâturage estival

Le deuxième enjeu majeur dans la gestion de la campagne de pâturage (le premier enjeu étant de maîtriser la pousse de l'herbe) est de passer cette période de quasi-arrêt de la pousse de l'herbe plus ou moins sévère selon la zone fourragère. Le début de cette période commence au moment où les vaches laitières sont affectées aux repousses des parcelles d'ensilage, d'enrubannage ou de foin, soit 4 à 6 semaines après la première récolte. Le déclenchement du pâturage estival est donc sous la dépendance des dates de première récolte et de la quantité d'herbe sur pied. Il s'agit d'une période d'arbitrage entre l'affectation à la fauche ou à la pâture des repousses. Peu d'exploitants semblent apporter du foin au pâturage durant cette période.

2.2.1.5 La rentrée des animaux à l'étable

La rentrée des animaux à l'étable est déterminée dans la majorité des cas (15 éleveurs) par les conditions climatiques telles que la neige et le froid car les éleveurs craignent une baisse de production de lait et rentrent les animaux précocement. La pousse insuffisante de l'herbe à cette époque est également citée par 10 éleveurs. Il n'a pas été possible de déterminer si les éleveurs jouaient sur les aptitudes des prairies pour rentrer les animaux le plus tardivement possible.

Parmi les indicateurs cités certains sont communs à tous les éleveurs (portance pour la mise à l'herbe) mais d'autres relèvent d'avantage de la structure de l'exploitation (mode de récolte, type de stabulation,...).

2.2.2 Première identification des critères pris en compte pour l'affectation des parcelles aux différentes activités

Le dépouillement des données parcellaires permet de constater que l'ensilage, l'enrubannage et le foin ventilé sont le plus souvent réalisés sur les parcelles proches du siège de l'exploitation (figure 1).

Dans les systèmes « foin séché au sol » (figure 2), le regain est récolté préférentiellement sur les parcelles éloignées, les repousses des parcelles proches étant réservées aux vaches laitières lorsque la surface de pâture n'est pas suffisante pour couvrir les besoins durant toute la durée de pâturage. Ceci est moins vrai lorsqu'il y a plusieurs modes de conservation des fourrages (notamment ensilage et foin séché au sol). En effet le regain peut être réalisé à la fois sur les parcelles les plus éloignées et sur les parcelles d'ensilage qui sont souvent proches du siège de l'exploitation.

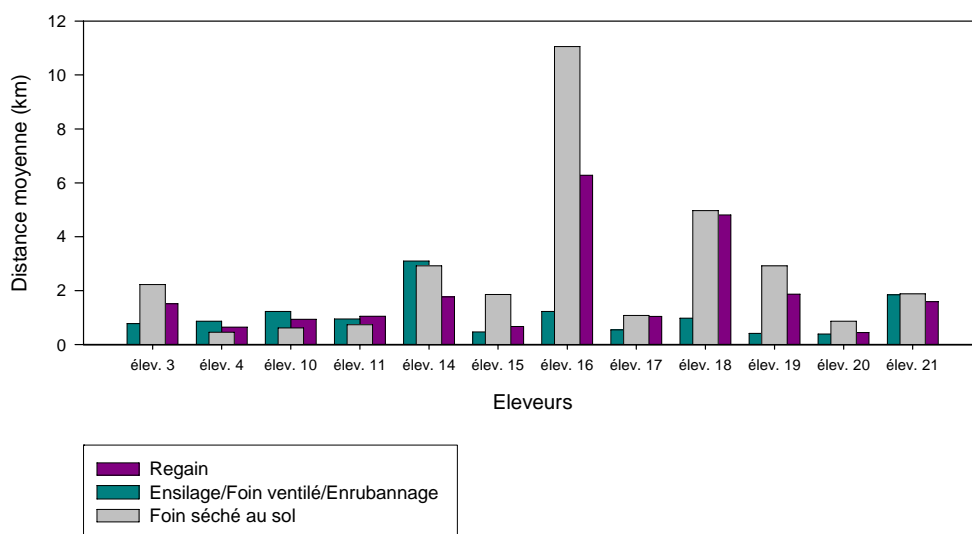


Figure 1 : Distance moyenne au siège de l'exploitation des parcelles affectées aux différents modes de récolte dans les systèmes « foin ventilé », « ensilage » et « enrubannage »

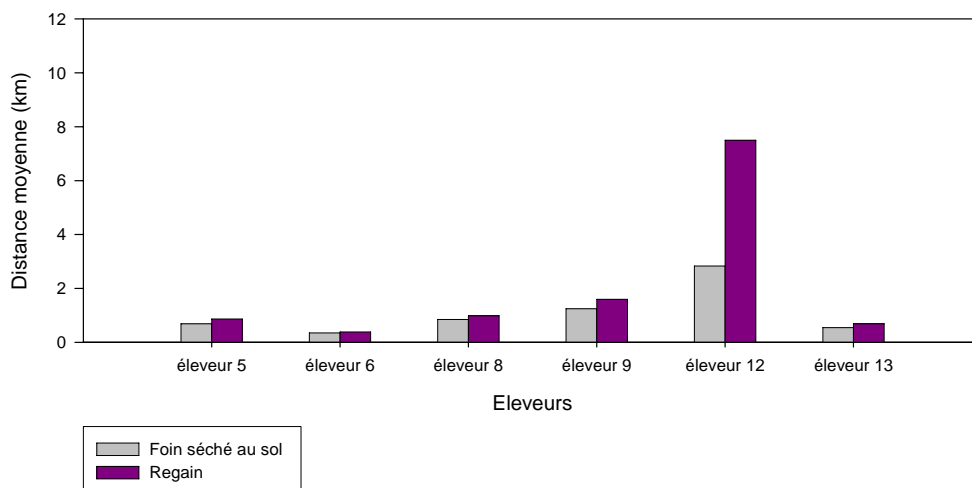


Figure 2 : Distance moyenne au siège de l'exploitation des parcelles de foin et de regain dans les systèmes « foin séché au sol »

Le dépouillement des données parcellaires ne met pas en évidence de relation aussi nette entre un usage et l'exposition ou l'altitude. Les enquêtes auprès des éleveurs indiquent pourtant que la distance au siège de l'exploitation n'est pas le seul critère pris en compte pour affecter une parcelle donnée à un usage (tableau 4).

Tableau 4 : Nombre de fois où un critère donné a été mentionné par les éleveurs comme déterminant de l'affectation des parcelles aux ateliers

		Distinction ateliers de pâturage et production de stocks	Distinction ateliers de première coupe précoce et tardif
Diversité du territoire	Sans interaction avec le climat	13	7
	Interagissant avec le climat	7	5
Autres	Remplissage du silo	-	2
	Quantité de stocks déjà récoltée	-	1
	Séquence sans pluie	-	1
Indéterminé		1	-

A travers les critères mentionnés par les éleveurs trois types de déterminants se dégagent :

1. **Matériel** : la prise en compte de caractéristiques telles que la topographie, la taille, révèle des contraintes d'ordre matériel. Ces exigences se rencontrent essentiellement

dans les systèmes ensilage (éleveurs 21, 20, 15) où les grandes parcelles facilement récoltables par la coopérative d'utilisation du matériel agricole (CUMA) sont affectées à l'ensilage. Ces parcelles sont dans la mesure du possible proches du siège de l'exploitation comme nous l'avons signalé précédemment.

2. *Organisation du travail* : la distance d'une parcelle au siège de l'exploitation qui est un facteur fréquemment cité révèle des contraintes d'organisation du travail. La proximité avec l'étable coïncide avec les contraintes de surveillance des animaux, la distance à parcourir avec des animaux à l'entretien comme l'ont mentionné d'autres études (Culos *et al.*, 1996).
3. *Prise en compte des potentialités parcellaires* : la précocité liée à l'exposition ou l'altitude est citée chez 7 éleveurs disposant de plusieurs modes de conservation des fourrages : au sein des prés de fauche, elle permet par exemple de distinguer les parcelles d'ensilage ou de foin ventilé des parcelles de foin séché au sol. Les parcelles d'enrubannage sont également les parcelles précoces mais, dans certains systèmes, il n'y a pas de parcelles bien définies pour l'enrubannage, car il est réalisé lorsque les conditions climatiques ne permettent pas de sécher au sol. Les végétations présentent des précocités différentes. Toutefois les éleveurs se sont peu exprimés sur leurs modalités de prise en compte des végétations dans les pratiques d'affectation. Ils mentionnent toutefois que les génisses et les vaches taries pâturent les prairies les plus pauvres. Des observations complémentaires apparaissent souhaitables.

Pour ces trois déterminants (matériel, travail, prise en compte des aptitudes des parcelles), les caractéristiques parcellaires jouent un rôle primordial. Leur prise en compte intervient dans la planification des surfaces affectées aux différentes activités.

Parmi les déterminants présentés dans le tableau 4, certains sont ponctuels et vont jouer dans l'affectation définitive de la parcelle, c'est à dire lors du pilotage. Ces indicateurs correspondent à l'arrivée progressive d'informations en cours de campagne. Ces informations sont de plusieurs types :

- *informations acquises* : quantité de stock déjà réalisée, taux de remplissage du silo ou des cellules en séchage en grange ;
- *informations présentes* : le climat à une date donnée ou plus fréquemment la séquence climatique autour de cette date, l'état de l'herbe (stade, quantité) sur la parcelle, l'état des autres parcelles (distance au siège de l'exploitation, état de l'herbe) ;

- *informations anticipées*
 - à court terme (prévisions météorologiques),
 - à moyen terme (ensilage des parcelles proches du siège de l'exploitation pour laisser les repousses aux vaches laitières).

Au sein des différents déterminants cités par les éleveurs, le facteur climat intervient à travers la prise en compte des aptitudes des prairies et de façon plus marquée dans les décisions relevant du pilotage (les conditions climatiques de la séquence de jours entourant la prise de décision, l'état de l'herbe sur les parcelles, l'usage prévu de la parcelle qui traduit une anticipation du climat futur).

2.2.3 Ordre d'utilisation des parcelles

2.2.3.1 Choix de la parcelle suivante

La distance des parcelles au siège de l'exploitation est le déterminant le plus fréquemment mentionné par les éleveurs. Chez certains, elle a été le seul déterminant cité alors que chez d'autres sont mentionnés l'altitude, l'exposition, la production de biomasse ou encore le caractère séchant des parcelles (tableau 5).

Tableau 5 : Nombre de fois où un critère donné est mentionné comme déterminant de l'ordre d'utilisation des parcelles de pâturage ou de récolte

Critères	Pâturage	Récolte
Distance	12	9
Biomasse disponible	3	3
Exposition	-	3
Altitude	4	1
Séchant	-	2
Indéterminé	2	3

2.2.3.2 Règle de passage d'une parcelle à l'autre pour le pâturage

Chez les éleveurs ayant une faible proportion de la SAU fauchable (tableau 2), les parcelles de pâturage sont exclusivement les parcelles non fauchables, il n'y a donc pas possibilité de les faucher en cas de pousse de l'herbe importante. La décision de sortie doit donc minimiser

les pertes sur l'ensemble des parcelles de pâturage. Elle tient donc compte de la quantité d'herbe sur la parcelle actuellement pâturée et sur les suivantes : on quitte la parcelle si la quantité d'herbe sur la suivante est trop importante. Chez les autres éleveurs, deux attitudes sont constatées :

- on ne quitte pas la parcelle tant qu'elle n'est pas finie, quitte à faucher les parcelles suivantes si épiaison (5 éleveurs) ;
- on surveille à la fois l'état de la parcelle suivante et l'état de la parcelle actuellement pâturée (10 éleveurs).

2.2.4 Surfaces tampons et souplesse du système fourrager

Nous avons constaté que les éleveurs réalisent ce que nous avons défini comme des ajustements (section 3.4 du chapitre 1) grâce à la mobilisation de surfaces tampons au printemps et durant l'été mais aussi grâce au déprimage dans certains cas (5 éleveurs).

Lors de la mise à l'herbe, le déprimage lorsqu'il est circonstanciel apparaît comme une façon de pallier le manque d'herbe en début de campagne.

Un certain nombre d'exploitants (14 sur 21) prévoient une à deux parcelles tampons pour lesquelles il y a arbitrage entre l'affectation à la fauche ou au pâturage en première partie de campagne. Ces parcelles tampons peuvent indifféremment être affectées à un usage ou un autre bien qu'on constate que les éleveurs les qualifient de trois façons différentes. Certains tampons sont en effet désignés comme :

- des « pâtures qui pourront être fauchées », l'ajustement du dimensionnement consiste alors à réduire la surface de pâturage (5 éleveurs) ;
- d'autres comme des « prés de fauche qui pourront être affectés au pâturage », il s'agit alors d'une réduction de la surface de fauche (4 éleveurs) ;
- d'autres encore n'ont aucune pré-affectation *a priori* (4 éleveurs).

Au printemps, la prévision de parcelles tampons n'est possible que lorsque le territoire d'exploitation présente peu de contraintes parcellaires. Lorsque 100% des prés fauchables sont pré-affectés à la fauche (en cas de surface fauchable par UGB limitante), seule une réduction de la surface de fauche est possible.

Durant l'été, les surfaces tampons sont constituées par les repousses de première coupe qui pourront être affectées à la récolte de regain ou au pâturage.

L'existence de ces surfaces tampons induit une incertitude sur la description fine par l'éleveur de la manière dont va se dérouler la campagne.

Plus globalement on constate lors des enquêtes que certains exploitants peuvent de façon précise décrire l'utilisation définitive des différentes parcelles, alors que d'autres ne peuvent la définir compte tenu des incertitudes sur le déroulement de la campagne. Ceci montre qu'il peut exister un plus ou moins grand degré de souplesse selon les systèmes.

Gras *et al.* (1989) définissent la souplesse d'un système de production comme l'aptitude à faire face aux perturbations (cultures à doubles fins, animaux tolérants, une date variable de vente pour s'adapter au cours du marché).

Nous avons évalué la souplesse des différents systèmes par la possibilité de décrire ou non de manière précise le déroulement de la campagne de pâturage et par le nombre d'ajustements des surfaces (déprimage, tampon printemps, regain) prévu par l'éleveur. Cette souplesse a été notée de 1 (pour les systèmes les moins souples) à 4 (pour les systèmes les plus souples) (tableau 6).

Tableau 6 : Souplesse du système fourrager

Souplesse du système	1	2	3	4
FS	3	2	-	-
FV	1	4	2	-
Enr	-	5	-	-
Ens	-	1	2	1

Dans les systèmes les moins souples (notés 1), l'usage de chaque parcelle est défini *a priori* et il est possible de retracer un calendrier fourrager relativement précis faisant apparaître l'ordre d'usage des parcelles.

Les systèmes très souples (notés 4) ne sont eux pas capables *a priori* de définir la séquence d'usage de leurs parcelles bien qu'un certain nombre de grandes règles soient définies comme « réserver les parcelles proches du siège de l'exploitation au premier passage des vaches laitières ». Le système permet des réponses faciles à mettre en œuvre, face aux perturbations soit pour en tirer parti lorsqu'elles sont favorables, soit pour leur faire face dans le cas inverse.

Hubert *et al.* (1995) distinguent des concepteurs de voiliers dont le système est prévu pour résister à n'importe quelle année au-delà des aléas et des barreaux qui évoluent au gré des événements mobilisant de nombreuses règles circonstancielles. Les éleveurs dont le système est noté 1 seraient donc des concepteurs de voiliers alors que ceux dont le système est noté 4 seraient des barreaux.

Le degré de souplesse permis au sein des systèmes est à mettre en relation avec les contraintes parcellaires et le mode de conservation des fourrages.

Les concepteurs de voiliers sont des exploitants ayant de fortes contraintes parcellaires ou tributaires du climat (système foin séché au sol). Ces contraintes nécessitent de penser de façon très précise et avec peu de marge de manœuvre la cohérence entre intrants, territoire et chargement. Les systèmes sont alors robustes conçus pour résister aux aléas de l'environnement quelle que soit l'année.

Les barreaux sont exclusivement des exploitants ayant peu de contraintes parcellaires (les parcelles peuvent ainsi être affectées indifféremment à la fauche ou au pâturage) et ayant une autonomie dans les dates de fauche (foin ventilé, enrubannage). Ils peuvent donc avoir une conduite très souple du territoire d'exploitation. Ces stratégies souples mobilisent très vraisemblablement un plus grand nombre de règles de pilotage que les systèmes robustes (qui eux mobiliseraient davantage de règles de planification), leur permettant de faire face aux perturbations.

On observe un gradient de situation selon l'importance des régulations prévues entre ces deux extrêmes (systèmes notés 2 et 3).

Les systèmes « foin séché au sol » plus tributaires du climat ont ainsi tendance à être plus robustes. Dans les systèmes « barreaux » que l'on retrouve essentiellement dans les systèmes enrubannage et foin ventilé, l'ensemble des parcelles mécanisables jouent cette fonction de tampon et, hormis les parcelles proches du siège de l'exploitation qui sont réservées au premier passage des vaches laitières, il n'y a pas de pré-affectation à un usage ou un autre.

Les caractéristiques parcellaires mais aussi le mode de conservation des fourrages et de ce fait la plus ou moins grande dépendance vis-à-vis du climat jouent *a priori* sur l'importance des ajustements mobilisés par l'éleveur.

Conclusion

La phase de pré-enquêtes met en évidence certains traits caractéristiques des différents modes de conservation des fourrages. Les systèmes « foin séché au sol » sont plus tributaires du climat puisqu'ils nécessitent une séquence sans pluie plus longue, sont moins exigeants quant à la qualité du fourrage récolté et paraissent plus rigides d'une année à l'autre que les autres systèmes. Les systèmes « enrubannage » et « foin ventilé » présentent beaucoup de similitudes concernant la souplesse de travail, le nombre de coupes plus élevé, des stades de récolte plus précoces, la volonté de prise en compte des potentialités des parcelles plus manifeste que dans les autres systèmes. Les systèmes « foin ventilé » se caractérisent par des chantiers de récolte plus longs liés à la capacité de séchage en cellule. Les systèmes « ensilage » se caractérisent par une faible influence du climat sur les dates de fauche, un stade de récolte relativement maîtrisé mais en revanche une influence des contraintes matérielles dans la prise de décision (taille et topographie de la parcelle, disponibilité des membres de la CUMA).

La distance des parcelles au siège de l'exploitation joue un rôle très structurant que ce soit pour leur affectation aux différentes activités ou pour le choix de leur ordre d'utilisation. Le manque d'informations sur les autres caractéristiques parcellaires relève probablement du fait que le questionnaire d'enquête n'a pas permis une étude suffisamment approfondie du territoire d'exploitation.

Nous avons recueilli quelques éléments sur la nature des parcelles affectées aux différentes activités (distance au siège de l'exploitation, altitude...) ; cependant nos informations étaient insuffisantes en termes de quantité de surface affectée.

Le discours des éleveurs (qui dans certains cas s'est révélé imprécis) a constitué notre principale source d'informations. Les insuffisances signalées montrent que pour mieux identifier les indicateurs mobilisés par les éleveurs dans la prise de décision, il est nécessaire de confronter le discours à des éléments factuels. Ces éléments correspondent à des données climatiques à comparer aux décisions des éleveurs, un tour de plaine pour connaître plus finement les territoires d'exploitation et leur diversité, un calendrier de pâturage pour enregistrer les pratiques.

Les enquêtes menées avaient pour objectif de mettre l'accent sur la planification de la campagne. Certains éléments du pilotage ont pu être mis en évidence. Cependant mener des entretiens aux différents moments-clefs identifiés permettrait de mieux déterminer les règles de pilotage et d'approfondir la caractérisation des ajustements mis en œuvre face aux aléas climatiques.

Cette phase de pré-enquêtes a mis en évidence des arbitrages entre différentes activités en ce qui concerne notamment les affectations de parcelles, et a révélé des compétitions nécessitant des ajustements. Ceci a souligné l'intérêt d'un découpage du système fourrager en entités gérées de façon autonome au quotidien mais coordonnées à certains moments-clefs.

En résumé la phase de pré enquête a vocation préparatoire a apporté quelques éléments de réponse, mais s'est révélée insuffisante pour comprendre de façon précise les déterminants de l'utilisation du territoire et la prise en compte de sa diversité. Elle a validé la nécessité de mettre en place un suivi et l'intérêt d'une approche par atelier.

Chapitre 4 - Le suivi

Introduction

L'objectif général de l'étude empirique est d'élaborer à partir de l'étude des règles de décision des éleveurs, des stratégies virtuelles d'utilisation du territoire à comparer par modélisation. La phase de pré-enquêtes, qui avait une vocation préparatoire, n'a pas fourni suffisamment d'éléments pour élaborer ces stratégies. Nous avons donc mené au cours de la campagne 2002 un suivi d'élevages. L'objectif plus spécifique assigné à l'analyse des résultats du suivi est de :

- reconstituer de façon plus précise les corps de règles de décision ;
- déterminer le poids du climat ainsi que les modes de prise en compte de la diversité du territoire au sein de ces règles ;
- renseigner sur les caractéristiques des parcelles et de la végétation à prendre en compte dans le modèle de simulation.

Le découpage du système fourrager en ateliers et l'identification des règles de décision régissant leur conduite, a servi de grille de lecture à l'analyse des décisions des éleveurs suivis.

Après avoir présenté la méthode de recueil des données (section 1), analysé les spécificités du climat 2002 (section 2.1) et décrit les exploitations suivies (section 2.2), nous nous focaliserons sur le dimensionnement et l'ordonnancement d'ateliers (section 2.3). A partir de cette analyse nous montrerons quelles stratégies peuvent être identifiées et servir de support aux stratégies à modéliser. La structure générale du sous-système décisionnel, dont les stratégies précédemment identifiées sont des variantes, sera enfin présentée (section 2.4).

1 Méthode

1.1 Découpage du système fourrager en ateliers et identification des règles de dimensionnement, ordonnancement et coordination

Pour chaque exploitation suivie, la première étape de la démarche consiste à identifier la structuration en ateliers du système fourrager.

Il existe deux types d'ateliers au sein du système fourrager : des ateliers fourragers (production de fourrages stockés et pâturage) qui constituent l'objet de notre recherche, et des ateliers « troupeau » (chapitre 1). Mais la question de la nature exacte des ateliers à identifier se pose.

Existe-t-il un ou plusieurs ateliers « pâturage » ? Combien d'ateliers de « production de fourrages stockés » doit-on distinguer ?

L'atelier se caractérise par un objectif de production, des tâches et des savoirs-faire et savoirs-comprendre spécifiques.

On peut donc distinguer autant d'ateliers « troupeaux » que de lots (tableau 7). En effet, dans les élevages laitiers, l'objectif associé au lot d'animaux en production (maintenir un niveau de production laitière) peut être considéré comme constant tout au long de la campagne même s'il mobilise des ressources différentes, et diffère de celui des lots d'animaux en croissance. Chacun de ces ateliers « troupeau » impose une demande spécifique aux ateliers fourragers. A chaque atelier troupeau correspond donc un atelier « pâturage » puisque la conduite du pâturage pour les animaux en production mobilise des savoirs-faire et savoirs-comprendre différents de celle des animaux à l'entretien ou en croissance.

L'atelier pâturage des vaches laitières peut être découpé dans le temps en plusieurs séquences, chacune d'elle correspondant à l'utilisation de ressources de caractéristiques différentes (Coléno et Duru, 1998) mais avec un objectif poursuivi identique (Duru et Hubert, 2003). Ces séquences correspondent par exemple au déprimage, au pâturage de printemps, d'été et d'automne.

Pour les ateliers de « production de fourrages stockés », on peut associer à un mode de conservation des fourrages un atelier distinct. Ainsi dans le cas d'une exploitation récoltant des fourrages à la fois par voie sèche et humide (ensilage et foin séché au sol par exemple) on

peut dissocier un atelier foin et un atelier ensilage. En effet, ces ateliers ne mobilisent pas les mêmes savoirs-faire et savoirs-comprendre : chaîne de récolte et indicateurs différents de même que l'objectif de production puisque ces stocks sont souvent destinés à des lots d'animaux distincts durant l'hiver (ensilage pour les vaches laitières, foin pour les génisses).

Pour la même raison on peut distinguer un atelier « récolte des regains » d'un atelier « foin de première coupe » puisque même si le mode de conservation du fourrage est identique (séchage au sol) la ressource produite joue un rôle différent dans la ration (regain souvent exclusivement destiné aux vaches laitières). Le nombre d'ateliers de production de fourrages stockés à distinguer au sein d'une exploitation dépend en fait de la distinction que l'éleveur établit entre les diverses catégories de fourrages conservés.

Tableau 7 : Exemple de structuration du système fourrager en ateliers

Type d'atelier	Nature des ateliers	Objectifs
Ateliers fourragers	Pâturage du lot A	Assurer l'alimentation du lot A de la mise à l'herbe à la rentrée à l'étable
	Pâturage du lot B	Assurer l'alimentation du lot B de la mise à l'herbe à la rentrée à l'étable
	Foin de première coupe	Produire un fourrage pour assurer l'alimentation de tout le troupeau durant l'hiver
	Regain	Produire un aliment pour l'hiver spécialement destiné au lot A car de meilleure qualité que le foin de première coupe
Ateliers troupeaux	Lot A	Produire du lait
	Lot B	Produire de la viande

Une fois la structuration en ateliers identifiée, la deuxième étape de la démarche consiste à caractériser pour chacun d'entre eux, les règles de dimensionnement, d'ordonnancement et de coordinations planifiées avant la campagne mais surtout ajustées lors du pilotage.

Le dimensionnement est caractérisé par les surfaces et les dates de début et de fin (ainsi qu'éventuellement les dates bornant les séquences des ateliers de pâturage) d'atelier.

Le début de la séquence de déprimage correspond à l'affectation des animaux à la première parcelle déprimée. Ce déprimage peut caractériser des pratiques différentes entre éleveurs puisque nous ne nous basons pas sur la définition agronomique du terme mais sur celle qu'en donne l'éleveur.

La séquence de pâturage de printemps débute avec la mise à l'herbe des animaux ou la fin de la séquence de déprimage lorsqu'elle existe. La séquence de pâturage estival débute avec la première affectation des animaux aux repousses de première coupe, le pâturage d'automne

débute avec l'affectation des animaux aux repousses de regain. Le début d'une séquence marque la fin de la séquence précédente.

L'ordonnancement est caractérisé par l'ordre d'utilisation des parcelles en relation avec leurs caractéristiques. Cela nécessite pour l'atelier pâturage de préciser la conduite (pâturage libre ou tournant, intervalle entre utilisations, ...) et pour les ateliers de production de fourrages stockés, la capacité de la chaîne de récolte.

1.2 Echantillon

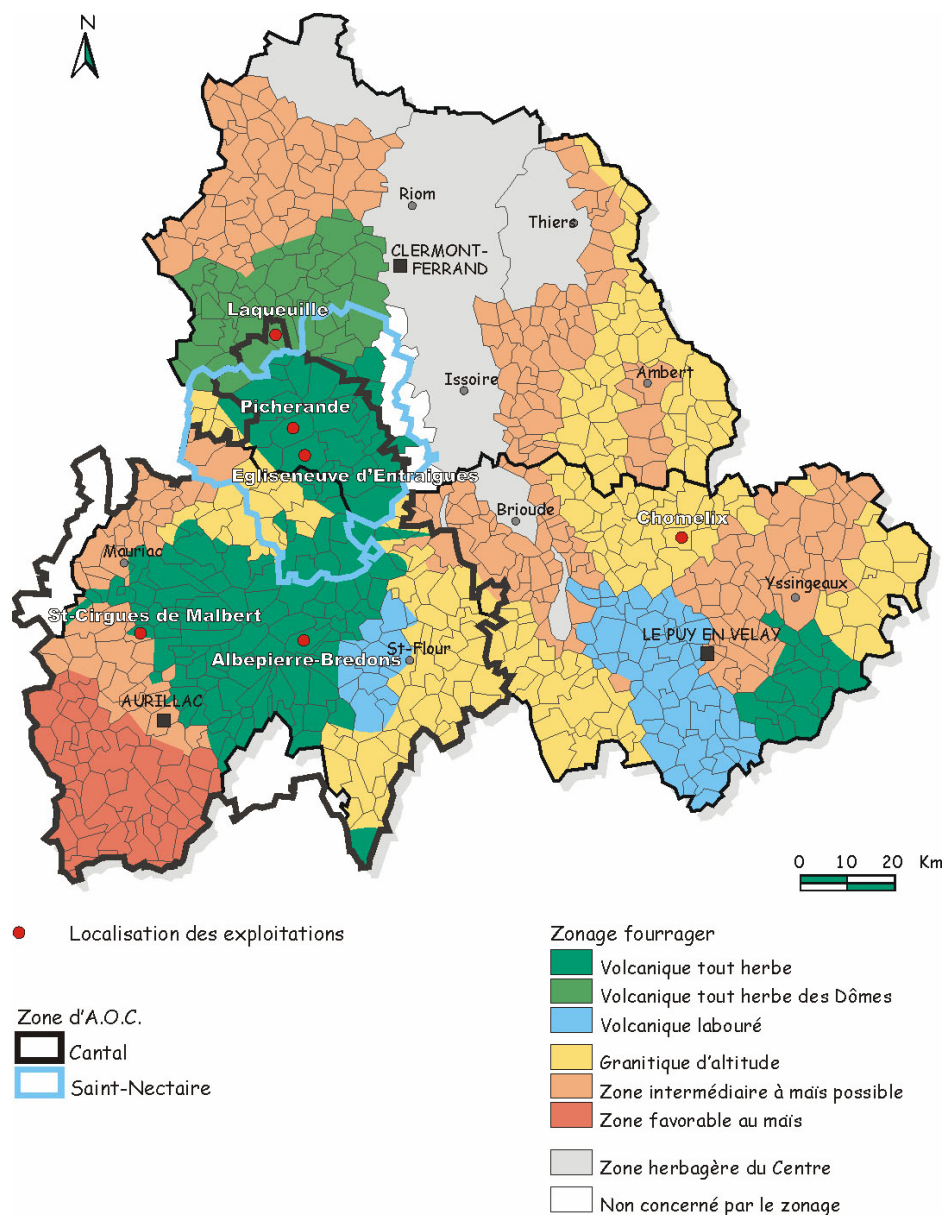
Nous n'avons pas cherché à constituer un échantillon exhaustif de la gamme des systèmes d'élevage d'herbivores existants en Auvergne. Tout comme pour les pré-enquêtes, nos critères de sélection ont été établis dans une optique de modélisation. En effet, nous souhaitions étudier des systèmes dont les stratégies d'utilisation du territoire serait relativement simples à décrire puis à modéliser. Nous ne souhaitons donc pas étudier de systèmes bovins allaitants aux règles d'allotements complexes ni de systèmes présentant des rotations entre cultures et pâturage. Les systèmes d'élevage retenus ont donc répondu aux exigences suivantes :

- système tout herbe ;
- une majorité de la surface occupée par la prairie naturelle ;
- spécialisation laitière.

Trois autres critères ont été retenus :

- des sensibilités du système fourrager aux aléas climatiques *a priori* différentes liées à des modes de conservation des fourrages distincts ;
- la proximité des systèmes d'élevage avec des stations météorologiques afin de disposer de données climatiques relativement précises ;
- des systèmes situés dans des zones présentant des contraintes climatiques différentes.

Nous avons choisi de mener cette étude dans des zones imposant des contraintes climatiques différentes car les modalités de gestion des aléas climatiques sont susceptibles d'être différentes. Les éleveurs choisis pour le suivi étaient donc situés dans la zone « volcanique tout herbe » où la pluviométrie importante est une contrainte pour la mise à l'herbe ou les dates de fauche, et dans les zones « volcanique labouré » et « granitique d'altitude » où le manque d'herbe durant l'été lié respectivement à la faible pluviométrie ou aux sols séchants peut être une contrainte importante à gérer (figure 3).



Source : Référence n°8 - Réseaux d'élevage d'Auvergne et Lozère - Septembre 2001

Réalisation : Laboratoire de traitement de données géographiques -  - Septembre 2004

Figure 3 : Localisation des exploitations suivies au sein des zones fourragères définies par le réseau d'élevage

Dans la zone volcanique tout herbe, nous souhaitons avoir un éleveur par mode de conservation des fourrages permettant des fauches précoces (ensilage, foin ventilé et enrubbage) et deux pour les systèmes « foin séché au sol » jugés plus sensibles aux aléas climatiques.

En zone de déficit fourrager estival, nous avons choisi de n'étudier que deux systèmes : un système pratiquant le foin séché au sol avec le risque de manque d'herbe durant l'été pour le pâturage comme pour la récolte de regain lié aux repousses tardives, comparé à un système ensilage pouvant avoir des repousses précoces.

Le faible nombre d'éleveurs retenu pour ce suivi a été dicté par le temps nécessaire à cette étude.

1.3 Données recueillies

1.3.1 Données climatiques

Les données quotidiennes de pluviométrie (P) et températures (T) des stations les plus proches des exploitations ont été recueillies pour la période allant de mars à novembre 2002.

Pour ces stations, les températures et la pluviométrie moyennes mensuelles recueillies sur plusieurs années (séries d'années plus ou moins longues selon les stations) ont permis de caractériser leur variabilité inter-annuelle (coefficient de variation) ainsi que les normales mensuelles. Ces dernières correspondent à la moyenne calculée à partir des données mensuelles de plusieurs années.

1.3.2 Enquêtes

Dans la mesure où nous souhaitons une description des règles de décision, l'enquête par questionnaire nous paraissait plus appropriée qu'une enquête par entretien utilisée préférentiellement pour appréhender les représentations des individus (Blanchet et Gotman, 2001). Nous avons préféré le questionnaire ouvert pour laisser plus de liberté à l'éleveur dans la formulation des réponses (Mucchielli, 1990 ; De Singly, 1992). Nous avons effectué une visite avant la mise à l'herbe. Le questionnaire pour cette première visite reprenait les rubriques de celui utilisé pour les pré-enquêtes (rubrique générale, description du territoire

d'exploitation sur un fond de carte IGN, description projective de la campagne). L'enjeu principal pour cette visite était d'identifier la planification de la campagne en cherchant à préciser non seulement les décisions d'ordre général mais aussi les éventuels ajustements résultant des régulations prévues.

Nous avons ensuite effectué 3 visites à divers moments-clefs de la campagne (pâturage de printemps/début de la campagne de fauche, pâturage estival, rentrée des animaux à l'étable) pour confronter la planification aux pratiques en cours de campagne et interroger les éleveurs sur les éventuelles différences constatées (Aubry *et al.*, 1998). Ces différences permettent de mettre en évidence des ajustements non signalés lors de la première visite et de voir comment sont pilotés le dimensionnement et l'ordonnancement des différents ateliers. En d'autres termes, ces visites permettent de préciser davantage les corps de règles de décision mobilisés par l'éleveur.

Des diagrammes de pilotage (Coléno, 1997) ont servi de guide d'entretien (annexes 2 et 3) à ces visites qui s'apparentaient à des entretiens semi-directifs. Ces diagrammes explicitent les différents ateliers, les moments-clefs pour chacun d'entre eux, les indicateurs de leur déclenchement, et les régulations prévues. Ces diagrammes ont été enrichis au cours des différentes visites afin de reconstituer en fin de campagne le corps de règles qui permet d'aboutir au dimensionnement et à l'ordonnancement mis en œuvre en 2002.

1.3.3 Calendrier de pâturage

Chacun des éleveurs a accepté de tenir un calendrier de pâturage où l'utilisation quotidienne de l'ensemble des parcelles est notée.

Ces calendriers ont permis de reconstituer les dates et les surfaces mobilisées par chaque atelier, l'ordre de succession des parcelles au sein d'un atelier, les intervalles entre utilisation d'une même parcelle.

Les dates de mise à l'herbe ou de fauche ont ensuite été confrontées avec les données météorologiques journalières pour comprendre dans quelles conditions se sont réalisés ces événements et ainsi préciser les indicateurs déclenchant les décisions des éleveurs.

Les ordres de succession des parcelles ont été mis en relation avec les caractéristiques parcellaires (distance au siège de l'exploitation, exposition, altitude, type de végétation...).

Ces informations ont été comparées à la planification annoncée par l'éleveur avant la campagne.

Les informations du calendrier de pâturage et les données climatiques ont permis la réalisation de traitements tels que le calcul du nombre de jours de consommation d'avance (JA) qui est un indicateur de la situation de trésorerie fourragère (au pâturage) résultant des flux de production et de consommation des fourrages au pâturage (Duru *et al.*, 1988a).

$$JA_i = \sum_{p=1}^n R_i (d'' - d') p \sum_{j=d} C_j / \sum_{j=d} C_j$$

C étant un paramètre climatique journalier, j un compteur de jour, R la part du pâturage dans le rationnement. La parcelle p est en phase de repousse en les dates d et d' et se trouve exploitée entre d' et d'' (temps de séjour du troupeau).

1.3.4 Tour de plaine

Afin de caractériser le territoire d'exploitation et mieux en appréhender la diversité nous avons réalisé un tour de plaine.

Pour chaque parcelle ont été identifiées les caractéristiques susceptibles d'influer sur leur utilisation à savoir : la pente, l'exposition, la nature de la roche mère, la texture dominante, la profondeur de sol, la présence ou non de roche affleurante ainsi que la flore.

Plutôt qu'une description exhaustive des espèces présentes nous avons cherché à caractériser les espèces dominantes auxquelles peuvent être associés des traits fonctionnels (White *et al.*, 2004). Nous avons donc établi cinq catégories en fonction des espèces dominantes :

- 1 : graminées à feuilles larges productives (ray-grass, dactyle) et une proportion de légumineuse de plus de 10% ;
- 2 : graminées à feuilles larges productives (ray-grass, dactyle) et quasi-absence voire absence totale de légumineuse ;
- 3 : graminées à feuilles larges moins productives que les deux catégories précédentes (houlque laineuse, pâturin, vulpin...) ;
- 4 : mélange de graminées à feuilles larges (espèces citées précédemment) et étroites (fétuque rouge, agrostis, flouve) ;
- 5 : majorité de graminées à feuilles étroites de milieu pauvre (nard raide) ainsi que présence de petits ligneux.

La flore de chaque parcelle a ainsi été répertoriée dans l'une de ces catégories. Ces catégories se rapprochent des groupes fonctionnels identifiés par Cruz *et al.*, 2002. Au sein de chacun

d'entre eux, la végétation possède un certain nombre de caractéristiques biologiques communes (surface foliaire, durée de vie des feuilles, phénologie) qui se traduisent par des propriétés agronomiques spécifiques.

Ce tour de plaine ainsi que les informations recueillies à partir des fonds de carte IGN (altitude, distance) permettent d'appréhender la diversité du territoire d'exploitation. L'écart-type de chacun des paramètres descriptifs d'une parcelle nous paraît être un critère satisfaisant pour caractériser au sein d'une exploitation sa variabilité inter-parcellaire.

2 Résultats

Après une description du climat de l'année 2002 (section 2.1), puis une présentation générale des éleveurs suivis (section 2.2), nous procéderons à une comparaison des différents systèmes sous l'angle du dimensionnement puis de l'ordonnancement (section 2.3).

2.1 Normales et climat de l'année 2002

2.1.1 Les normales

Tableau 8 : Liste des stations météorologiques

Eleveur	Localisation des élevages	Stations météorologiques	Altitude	Données fournies
Ma	Laqueuille (1)	Laqueuille	920	Précipitations et températures
Be	Picherande	Picherande	1100	Précipitations
		Besse	1050	Températures
Go	Eglise Neuve d'entraigues	Saint Genes Champespe	1020	Précipitations
		Besse	1050	Températures
Am	Saint Cirgues de Malbert	Saint Illide	620	Précipitations
		Marmanhac	650	Températures
Ch	Albepierre bredons	Laveissière	1238	Précipitations et températures
Mo	Chomelix	Chomelix	910	Précipitations
		Felines	1020	Températures
Me	Landos	Landos	1148	Précipitations et températures

(1) Sur la station de Laqueuille nous n'avons récolté que 7 ans de données

2.1.1.1 Températures

Entre stations (tableau 8), le régime thermique est à peu près similaire (figure 4). L'allure des courbes est en effet semblable avec néanmoins des mois de juillet et août plus chauds à Marmanhac, et plus froids à Besse. La station de Marmanhac, qui est la plus basse en altitude, présente une température annuelle plus élevée que les autres stations (tableau 9). La température moyenne annuelle est légèrement inférieure pour la station de Besse. L'amplitude thermique est à peu près similaire entre stations.

Tableau 9 : Température moyenne annuelle, amplitude thermique, température minimale et maximale des stations

Stations	Température moyenne annuelle (1)	Moyenne des Températures maximales (2)	Moyenne des Températures minimales (2)	Amplitude thermique moyenne(3)
Marmanhac	10,25	18,94	1,8	17,13
Landos	7,16	16,33	-1,3	17,64
Laqueuille	7,99	16,26	0,09	16,17
Chomélix	7,28	16,02	-1,2	17,19
Laveissière	7,02	15,58	-1,14	16,72
Besse	7,87	16,78	-0,11	16,88

(1) : moyenne des températures des 12 mois de l'année établie sur plusieurs années.

(2) : moyenne de la valeur mensuelle la plus élevée (ou la plus basse) établie sur plusieurs années.

(3) : moyenne de l'amplitude (valeur mensuelle maximale – valeur mensuelle minimale) établie sur plusieurs années.

2.1.1.2 Pluviométrie

Laveissière est la station la plus arrosée avec une moyenne annuelle de 2237 mm (tableau 10). Le minimum de pluviométrie est atteint durant les mois de juin à août avec 120 mm et le maximum durant l'hiver où les précipitations sont supérieures à 200 mm (figure 4).

La moyenne annuelle des stations de Picherande et Saint Genes Champespe atteint respectivement 1678 et 1610 mm. Sur ces stations la répartition mensuelle des précipitations est régulière.

A Saint Illide les précipitations mensuelles sont également régulières comprises en 80 et 120 mm durant 9 mois sur 12. Les minimums de pluviométrie sont atteints durant les mois de mars et août. La moyenne annuelle est légèrement inférieure à celles des stations précédentes.

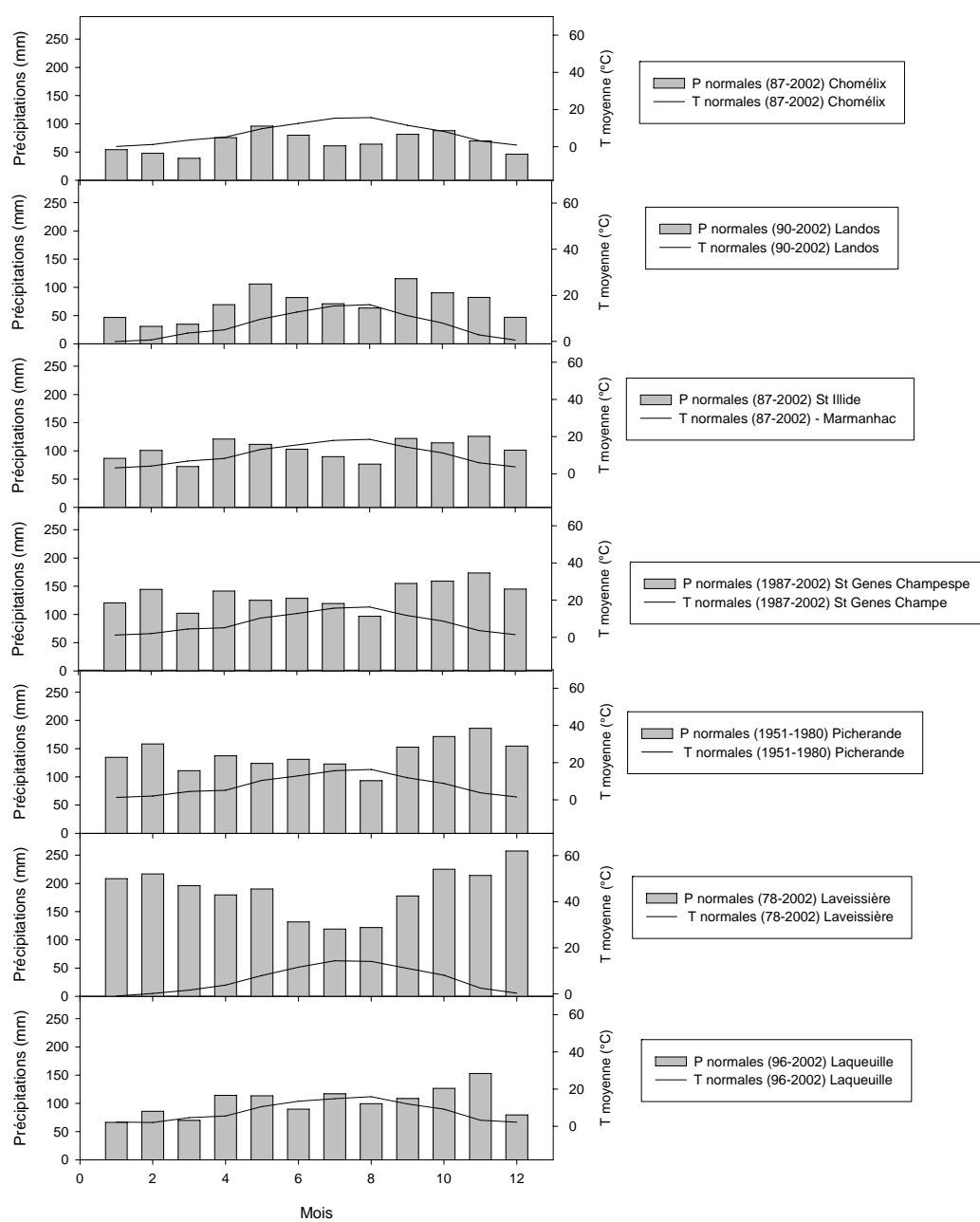


Figure 4 : Diagramme précipitations-température

Sur la station de Laqueuille, les précipitations moyennes annuelles sont comparables à celles de Saint Illide. La répartition saisonnière des précipitations est régulière avec un minimum durant l'hiver.

Sur les stations de Landos et Chomelix, les précipitations sont plus irrégulières et plus faibles que sur les stations précédentes avec respectivement 838,3 et 801 mm de moyenne annuelle de pluviométrie, soit près de la moitié de celles observées à Picherande.

Tableau 10 : Précipitations moyennes annuelles

Station	Chomelix	Landos	Laqueuille	St Illide	St Genes Champespe	Picherande	Laveissière
Moyenne annuelle (mm)	816	838	1223	1227	1610	1678	2237
Coefficient de variation	0,19	0,14	0,11	0,13	0,15	0,13	0,15

2.1.1.3 La variabilité inter-annuelle des températures et de la pluviométrie

Les tableaux 10, 11 et 12 mettent en évidence une variabilité inter-annuelle du climat non négligeable pour les stations étudiées que ce soit à l'échelle annuelle ou mensuelle. Elle est cependant relativement faible en ce qui concerne les moyennes annuelles, ce qui indique des phénomènes de compensation d'un mois à l'autre, mais élevée pour les normales mensuelles. Bien qu'une base décadaire soit plus pertinente pour tirer des conclusions en termes de gestion, ces coefficients de variation élevés pour les normales mensuelles soulignent les difficultés de gestion causées aux éleveurs par le climat. Sur les mois encadrant la campagne fourragère (mars à novembre), la variabilité des précipitations est la plus importante durant les mois de mars, avril, juin et novembre (coefficient de variation supérieur à 0,5). Cela illustre la variabilité des conditions en début de période de pâturage (à la fois pour la production d'herbe et la portance) mais aussi pour la récolte et la rentrée des animaux. Les coefficients de variation des températures sont négligeables (inférieures à 0,1) pour les mois de juin à août et croissants au fur et à mesure que les températures mensuelles diminuent.

Tableau 11 : Coefficients de variation des normales mensuelles de pluviométrie

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
St Illide	0,71	0,56	0,86	0,54	0,40	0,58	0,42	0,45	0,42	0,45	0,52	0,58
Landos	0,76	0,70	1,06	0,57	0,35	0,64	0,43	0,37	0,45	0,36	0,58	0,60
Chomelix	0,65	0,51	0,78	0,56	0,39	0,65	0,48	0,45	0,52	0,36	0,60	0,53
Laqueuille	0,60	0,45	0,98	0,72	0,23	0,41	0,32	0,23	0,43	0,33	0,40	0,62
Laveissière	0,60	0,56	0,87	0,58	0,46	0,66	0,50	0,24	0,61	0,33	0,52	0,56
Picherande	0,73	0,55	0,81	0,57	0,33	0,53	0,40	0,34	0,39	0,34	0,44	0,58
Saint Genes Champespe	0,67	0,52	0,76	0,52	0,37	0,54	0,33	0,37	0,48	0,37	0,46	0,62

Tableau 12 : Coefficients de variations des normales mensuelles de température

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
Marmanhac	0,66	0,43	0,22	0,13	0,12	0,07	0,07	0,06	0,11	0,14	0,25	0,51
Landos	17,68	3,01	0,43	0,17	0,14	0,07	0,09	0,07	0,15	0,22	0,71	2,49
Chomelix	12,42	1,61	0,45	0,18	0,15	0,08	0,08	0,06	0,15	0,18	0,57	1,92
Laqueuille	0,66	1,32	0,29	0,21	0,13	0,09	0,06	0,09	0,16	0,18	0,51	0,80
Laveissière	7,37	2,07	0,75	0,23	0,21	0,09	0,11	0,08	0,17	0,17	0,62	2,00
Besse	1,10	0,97	0,33	0,27	0,14	0,11	0,10	0,07	0,14	0,23	0,49	1,27

2.1.2 Caractéristiques des conditions météorologiques de la campagne 2002 (mars à novembre) par rapport aux normales

2.1.2.1 Les températures 2002

Les températures sont globalement assez proches des valeurs normales hormis la certaine douceur des mois de mars et avril ainsi qu'un mois de juin plus chaud (figure 5). A Landos on note cependant que le mois de juin est plus froid que les valeurs normales et les mois de septembre à novembre plus chauds.

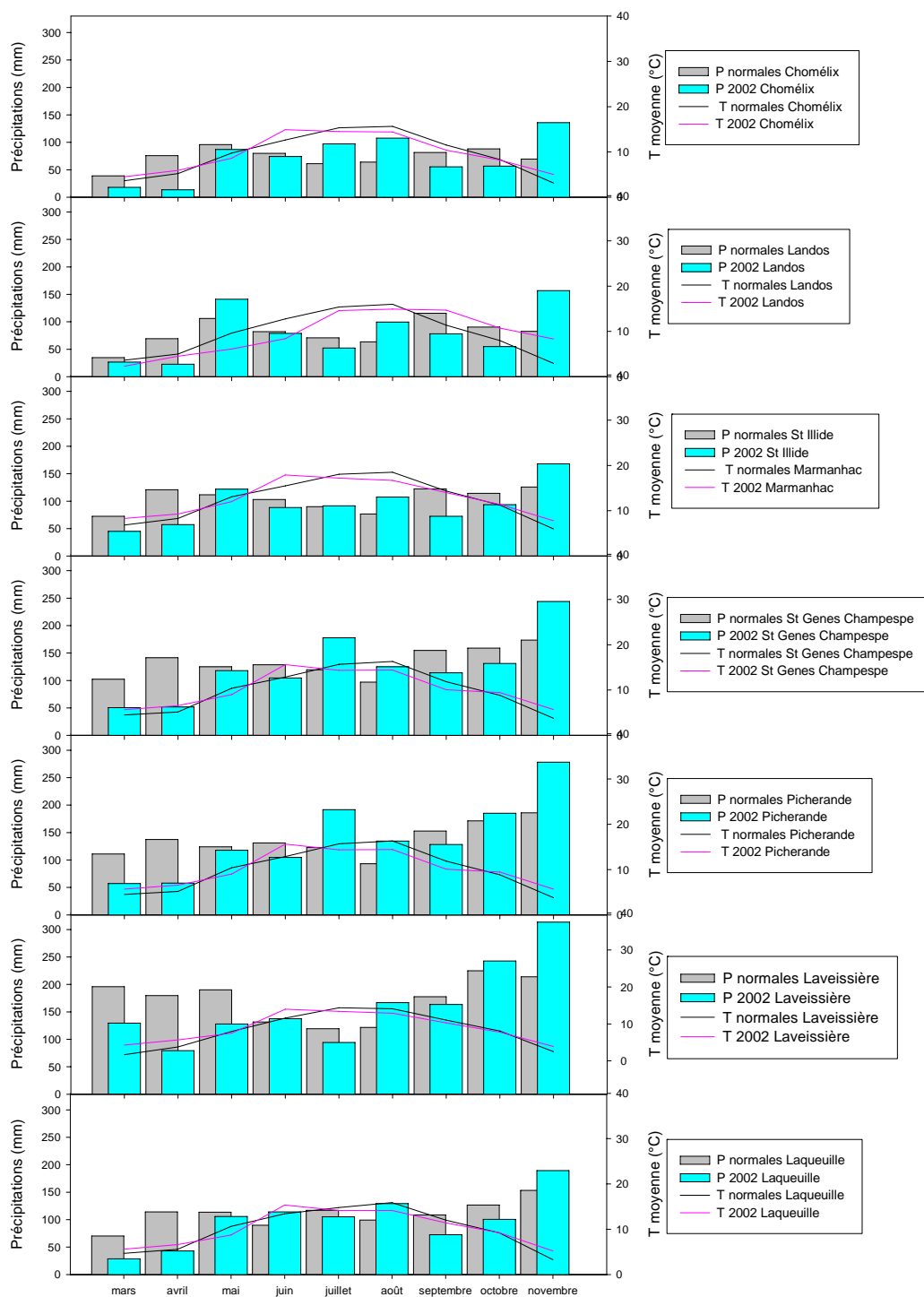


Figure 5 : Comparaison de la pluviométrie et des températures normales de l'année 2002

2.1.2.2 Les précipitations 2002

Les précipitations sont déficitaires durant les mois de mars et avril sur toutes les stations (figure 5). Ce déficit est cependant plus ou moins marqué selon les stations. Les mois de mai et juin sont relativement conformes aux normales, on constate toutefois un mois de mai excédentaire sur la station de Landos et déficitaire à Laveissière. A Chomelix et Picherande, et Saint Genes Champespe, les mois de juillet et août sont excédentaires. A Landos, St Illide, Laveissière, ou Laqueuille, l'excédent concerne plus spécifiquement le mois d'août. En revanche les mois de septembre et octobre sont déficitaires sur toutes les stations (le déficit ne concerne que le mois de septembre pour les stations de Picherande et Saint Genes Champespe). Sur toutes les stations, les précipitations du mois de novembre sont supérieures aux normales.

Le déficit de précipitations en début de campagne a pu gêner la pousse de l'herbe. Cependant il a été compensé par un été pluvieux qui a pu permettre une reprise de la pousse favorisée par des températures élevées en juin mais gêner les récoltes durant l'été.

2.2 Présentation générale des élevages suivis

Il s'agit d'unités de production de taille moyenne comprise entre 40 et 65 ha (la taille moyenne des exploitations en Auvergne est de 50,4 ha) hormis celle de Go, qui avec 100 ha, constitue une grosse unité de production pour la région (tableau 13). Dans ces exploitations, les chargements sont relativement homogènes et faibles (tous inférieurs à 1,2 UGB par hectare). Le niveau de production laitière par vache est lui aussi relativement homogène hormis dans l'exploitation de Me pour laquelle le plus faible niveau de production est représentatif des systèmes traditionnels foin séché au sol en Haute-Loire (Tendille, com. pers.). Les vêlages sont étalés ou concentrés au printemps chez cinq des sept éleveurs. Chez Go et Be les vêlages interviennent en fin d'automne ou début d'hiver.

L'achat de fourrages est généralement occasionnel.

Pour toutes les activités (quotidiennes ou saisonnières), la cellule de travail est composée d'une personne à temps complet chez cinq des sept éleveurs, et de deux personnes dans deux cas (Be dispose de l'aide de son fils et Go d'un salarié). Les épouses de tous les éleveurs

participent aux travaux de l'exploitation pour la traite ou la transformation fromagère (épouses de Be et Go) ou encore la surveillance des génisses (épouse de Ch). Les parents retraités (chez Mo, Ma) mais aussi les enfants (Go, Ch) apportent une contribution au travail variable durant l'année (en fonction dans le dernier cas des vacances scolaires).

Trois des sept éleveurs disposent d'une salle de traite mobile : Go, Ch, Be. Chez le premier, l'importante SAU se traduit par des distances importantes à parcourir par les animaux et justifie le recours à une salle de traite mobile. Pour les deux autres, un territoire dispersé et plus de 40 % de la SAU non fauchable (tableau 14) les contraignant à faucher 100 % de la surface fauchable, justifient la salle de traite mobile.

Les niveaux de diversité du territoire sont contrastés d'une exploitation à l'autre (tableau 15). Ainsi Be et Ch présentent les territoires les plus divers en termes d'altitude, exposition, type de végétation. Suivent Me, Mo et Am qui ont une diversité moindre mais néanmoins prononcée. Toutefois les deux premiers présentent une diversité des types de végétation alors que les prairies de Am se rapportent quasiment à un seul type de végétation. La diversité du territoire de Ma résulte des types de végétation et de la distance. Le territoire le plus homogène est celui de Go hormis en ce qui concerne les types de végétation.

En résumé les exploitations présentent une diversité du territoire contrastée résultant essentiellement de la structure du territoire. Pour ce qui est du type de végétation, la diversité est toujours importante pour toutes les exploitations (excepté Am). Les causes de cette diversité des prairies sont néanmoins différentes. Chez Mo elle provient essentiellement de la présence de prairies naturelles de type 4 et de prairies temporaires de type 1 ou 2. Cette diversité est aussi induite par les contraintes de milieu (sol squelettique, tourbière...).

Le fait que des exploitations ayant des contraintes du milieu très différentes présentent des diversités des types de végétation équivalentes laisse toutefois penser que les modes d'utilisation des parcelles sont pour une large part à l'origine de cette diversité. Les modes d'utilisation des parcelles sont en effet associés à des conduites de fertilisation (annexe 4) et des modes de défoliation spécifiques. Ainsi chez Go qui dispose d'un parcellaire relativement homogène, on constate une différence assez marquée entre les prairies de fauche et les parcelles de pâturage (figure 6), nous reviendrons sur ces aspects dans la section 2.3.1.3.

Tableau 13 : Présentation générale des exploitations suivies

Nom	Zone fourragère	Modes de conservation des fourrages	Surface totale (ha)	Surface fauchée/ Surface fauchable (%)	Surface fauchable/ UGB (ha)	Nombre d'UGB	Chargement (UGB/ha)	Quantité de lait par vache (l/an)	Stabulation des vaches laitières	Répartition des vêlages	Achat de fourrages 2002	Salle de traite mobile
Be	volcanique tout herbe	Foin ventilé	63,5	100	0,49	67	0,9	6000	libre	décembre	non	oui
Go	volcanique tout herbe	Ensilage, foin séché au sol	98	50	0,76	116	1,15	6000	libre	sept-déc	non	oui
Ch	volcanique tout herbe	Enrubannage, foin séché au sol	65,8	100	0,58	56	0,84	5641	entravée	50% avril à août	non	oui
Ma	volcanique tout herbe	Foin séché au sol	42	64	0,81	43	1,02	6055	entravée	étalée	non	non
Am	volcanique tout herbe	Foin séché au sol	40	69	0,79	44	1	6900	entravée	étalée	non	non
Mo	granitique	Ensilage, enrubannage, foin séché au sol	39	67	0,82	43	1,1	6492	libre	étalée	oui	non
Me	volcanique labouré	Foin séché au sol	49	65	0,88	42	0,9	3655	entravée	mars-avril	non	non

Tableau 14 : Description des territoires d'exploitation

	Be	Go	Ch	Ma	Am	Mo	Me
Distance moyenne au siège de l'exploitation (km)	1,34	0,39	1,9	1,24	0,36	1,63	0,7
Altitude moyenne (m)	1104	1050	1102	921	556	929	1100
Type de végétation moyen	3,09	3,00	3,25	2,76	3,34	2,50	3,46
Gradient d'altitude (m)	226	40	300	80	100	140	130
Exposition (%)	95,60	20,72	100	34,26	74,29	35,57	82,25
Surface non fauchable (%)	48	10	51	17	13	10	25

Tableau 15 : Ecart-type des caractéristiques parcellaires

	Be	Go	Ch	Ma	Am	Mo	Me
Distance au siège de l'exploitation	1,43	0,29	1,24	1,28	0,42	1,35	0,66
Surface fauchable	0,50	0,34	0,50	0,34	0,36	0,3	0,44
Altitude	56,35	12,75	136,02	24,76	36,52	43,09	48,07
Type de végétation	1,36	0,91	1,01	1,21	0,47	1,48	1,17
Exposition	0,86	0,23	0,60	0,30	0,44	0,43	0,95

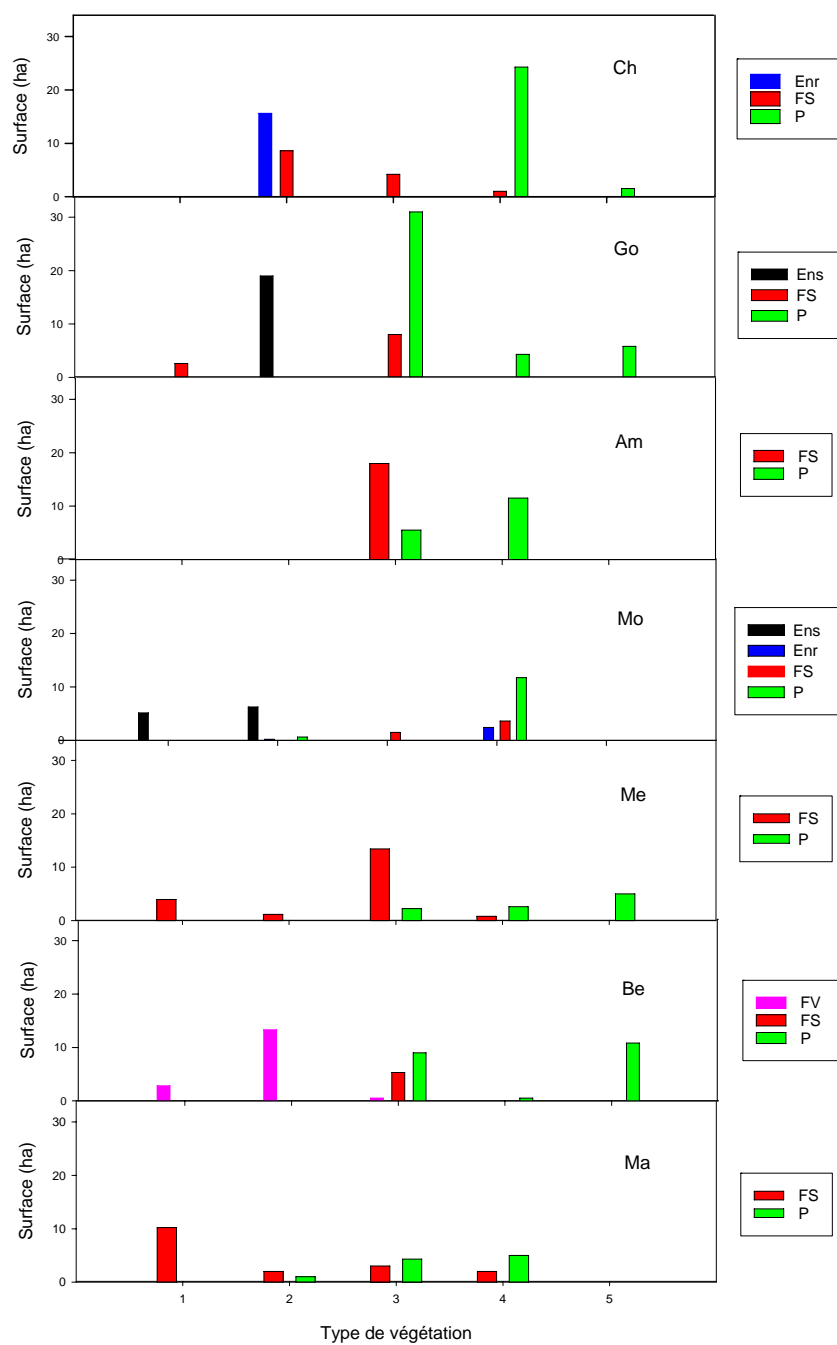


Figure 6 : Répartition des surfaces entre les ateliers de première coupe (E, FV, FS, Enr) et de pâturage des vaches laitières (P) selon le type de végétation chez chaque éleveur

2.3 Comparaison des systèmes

Les différents systèmes fourragers sont comparés sous deux angles :

- le dimensionnement (section 2.3.1);
- l'ordonnancement (section 2.3.2).

Ces deux angles constituent les deux composantes de l'utilisation du territoire dont chacune fait l'objet d'une hypothèse à tester. Pour chacune, nous présentons le dimensionnement ou l'ordonnancement réalisé en 2002 mais nous nous focalisons ensuite sur les modalités d'ajustements et de mise à profit de la diversité du territoire. Nous supposons en effet que ces modalités permettent de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques (section 4 de la 1^{ère} partie).

2.3.1 Dimensionnement

Dans cette section nous présentons trois types de résultats :

- le dimensionnement établi par les éleveurs en 2002 (section 2.3.1.1) ;
- une analyse des ajustements du dimensionnement (section 2.3.1.2) ;
- une analyse de la relation entre planification du dimensionnement et diversité du territoire (section 2.3.1.3).

Les résultats présentés concernent à chaque fois les deux volets du dimensionnement à savoir les surfaces affectées à l'atelier et sa période calendaire.

Nous focalisons notre étude sur les ateliers de production de fourrages stockés et l'atelier « pâturage des vaches laitières » car nous verrons dans la section 2.3.1.4 que pour les ateliers de pâturage des animaux en croissance ou à l'entretien, les ajustements sont mineurs.

2.3.1.1 Dimensionnement réalisé en 2002

A. Les surfaces

Le tableau 16 présente le dimensionnement établi en 2002 pour les ateliers de production de fourrages stockés et l'atelier de pâturage des vaches laitières. Pour les ateliers de production

Tableau 16 : Dimensionnement établi en 2002 pour les ateliers de production de fourrages stockés et pâturage des vaches laitières

Eleveurs	Rappel altitude	Ateliers et séquences	Date début en 2002	Date fin en 2002	Durée des ateliers (jours)	Surface de base (ha/UGB)	Surface finale (ha/UGB)
Ch	1102	Enrubannage	29/05	16/06	18	0,29	0,29
		Foin au sol	28/06	18/07	20	0,19	0,19
		Regain	30/07	05/09	37	0,28	0,28
		Déprimage	28/04	22/05	24	0,15	0,15
		Pât.printemps	23/05	09/08	79	0,42	0,42
		Pât.été	10/08	13/10	74	0,96	0,96
		Pât.automne	14/10	25/11	35	1,36	1,36
Ma	921	Foin au sol	01/06	20/07	50	0,47	0,51
		Regain	28/07	15/09	18	0,29	0,31
		Pât.printemps	28/03	07/08	123	0,52	0,59
		Pât.été	08/08	26/09	49	0,66	0,63
		Pât.automne	27/09	15/11	49	0,76	0,76
Am	556	Foin au sol	22/06	27/07	35	0,56	0,56
		Regain	15/09	15/09	1	0,20	0,07
		Déprimage	15/03	19/05	65	1,08	1,08
		Pât.printemps	20/05	27/07	71	0,45	0,45
		Pât.été	28/07	21/11	113	0,62	1,08
Mo	929	Ensilage	25/05	25/05	1	0,31	0,31
		Enrubannage	13/06	13/06	1	0,07	0,07
		Foin au sol	22/06	29/06	7	0,10	0,17
		Regain ensilé	06/07	06/07	1	0,18	0,18
		Regain	14/08	14/08	1	0,03	0,30
		Pât.printemps	07/04	15/06	69	0,29	0,34
		Pât.été	16/06	19/08	64	0,53	0,58
		Pât.automne	20/08	31/10	72	0,94	0,79
Go	1050	ensilage	08/06	10/06	2	0,20	0,20
		Foin au sol	25/06	15/07	20	0,09	0,16
		Regain	25/07	03/09	40	0,20	0,30
		Pât.printemps	13/05	07/08	86	0,48	0,48
		Pât.été	08/08	11/09	34	0,54	0,56
		Pât.automne	12/09	07/11	56	0,76	0,76
Be	1104	Foin ventilé	30/05	21/06	22	0,30	0,30
		Foin au sol	26/06	20/07	24	0,22	0,22
		Regain	14/08	17/09	38	0,47	0,35
		Déprimage	19/04	25/05	36	0,00	0,42
		Pât.printemps	26/05	25/08	91	0,55	0,55
		Pât. été	26/08	01/10	36	0,60	0,76
		Pât. automne	02/10	02/11	30	1,16	1,16
Me	1100	Foin au sol	18/06	03/07	15	0,45	0,50
		Pât. printemps	06/05	18/07	72	0,35	0,39
		Pât. été	19/07	07/11	105	0,89	0,89

de fourrages stockés, les surfaces sont divisées par le nombre total d'UGB de l'exploitation c'est-à-dire par l'ensemble du troupeau. Pour l'atelier de pâturage des vaches laitières, les surfaces sont divisées par le nombre d'UGB de l'atelier c'est à dire le nombre de vaches en lactation.

L'entretien mené avant la mise à l'herbe a permis d'évaluer les surfaces de base, autrement dit les surfaces affectées de façon prioritaire aux différents ateliers lors de la planification. Le calendrier de pâturage a permis de faire le point sur les parcelles affectées en définitive (surface finale) à ces différents ateliers au cours du pilotage de la campagne.

Pour un atelier donné, lorsque la surface finale est plus importante que la surface de base, cela signifie que des parcelles tampons ont été affectées à cet atelier. Dans deux cas, Ma et Mo, on observe durant la séquence de pâturage d'été, une surface finale utilisée inférieure à ce qui avait été planifié. Cela s'observe en cas de forte production d'herbe durant l'été et montre que l'été la distinction entre surfaces tampons et surfaces de base est moins clairement établie que durant le printemps. En effet au cours de l'été, les parcelles fauchées en première coupe peuvent potentiellement toutes être ou pâturées ou fauchées et, bien que des priorités soient faites (en général les parcelles de l'atelier de première coupe le plus précoce sont fauchées en regain), la proportion de parcelles effectivement affectée à l'un ou l'autre des ateliers est dépendante des conditions de l'année.

Ces fluctuations entre surface de base et surface finale correspondent aux ajustements apportés par l'éleveur.

L'importance de ces ajustements diffère entre exploitations mais également entre les ateliers d'une exploitation. Ainsi chez Ch, il n'y a aucun ajustement entre les surfaces de base planifiées et les surfaces finales affectées aux ateliers alors que chez Ma par exemple ils concernent tous les ateliers (au sein de l'atelier pâturage deux séquences sur trois) et chez Mo trois ateliers sur six. Chez ce dernier, les ajustements sont réalisés entre les différentes séquences de l'atelier pâturage et les ateliers foin de première coupe, ou regain et ne concernent pas l'ensilage ou l'enrubannage.

D'une manière générale, les surfaces pré-affectées au plus précoce des ateliers de première coupe (ateliers ensilage, enrubannage ou foin ventilé) n'ont pas fait l'objet d'ajustement et correspondent dans tous les cas aux surfaces finales. Les surfaces de l'atelier foin de première coupe ont été ajustées dans quatre cas sur sept. Les surfaces de l'atelier regain font en revanche presque systématiquement l'objet d'ajustements (cinq cas sur six). Le pâturage de

printemps a fait l'objet d'ajustement dans quatre cas sur sept, le pâturage d'été dans cinq cas sur sept. Les surfaces du pâturage d'automne ne font pas l'objet d'ajustement (hormis chez Mo) puisqu'à cette période, la quasi-totalité de la surface est offerte aux animaux et il est rare de pouvoir réaliser une troisième coupe.

Dans le cas du pâturage on constate que le dimensionnement des surfaces de base au printemps est inférieur chez les deux éleveurs situés en zone séchante. Ce résultat est conforme à celui du référentiel fourrager (Réseaux d'élevage, 2001b) qui indique pour des systèmes ensilage une surface inférieure de 10 ares par UGB en zone « granitique d'altitude » par rapport à la zone « volcanique tout herbe » (tableau 17). Le référentiel fourrager présente des repères concernant les productions, les surfaces affectées au pâturage ou aux stocks, la fertilisation minérale des différentes zones fourragères (Reuillon et Violleau, 1998). Ces repères sont établis à partir des résultats de fermes de référence.

Tableau 17 : Surfaces indiquées par le référentiel fourrager en zone « volcanique tout herbe » (ares/UGB)

	Ensilage	Foin séché au sol
Pâturage seulement	50	40
Première coupe	50	60
Seconde coupe	30	5

Pour un chargement de 1 UGB par hectare

Le dimensionnement des surfaces de base semble néanmoins légèrement sous-dimensionné chez Mo par rapport à ce référentiel. Pour les autres éleveurs le dimensionnement des surfaces de base au printemps est conforme aux surfaces indiquées par le référentiel fourrager. Il faut toutefois signaler que lorsque la surface fauchable par UGB est limitante, elle conditionne à la fois la taille de l'atelier pâturage et celle de l'atelier foin séché au sol (Be et Ch).

Considérant la surface finale affectée aux ateliers de pâturage on constate qu'il est possible de mettre en relation la surface finale de la séquence pâturage de printemps avec sa durée (figure 7). La durée du pâturage de printemps dépend de la date de mise à l'herbe et de la date de mise à disposition des repousses de première coupe. Plus longue est la durée de cette séquence, plus la surface qui lui est affectée est importante. La relation est meilleure (figure 8)

lorsque sont agrégées la séquence de déprimage constatée chez Ch, Be, et Am et la séquence de pâturage de printemps proprement dite. Chez Ma, Am, les durées longues de pâturage de printemps sont dues à des mises à l'herbe précoces. Chez Be, la longue durée du pâturage de printemps est due au fait que l'élargissement de la surface de pâturage l'été mobilise les repousses de l'atelier « foin au sol de première coupe » plutôt que celles de l'atelier « foin ventilé » plus précoces.

Il existe de la même manière une relation (figure 9) entre l'élargissement de la surface de pâturage établi durant l'été et la durée de la séquence de pâturage d'été.

Plus la surface affectée au printemps aux animaux est importante, plus la mise à l'herbe peut être précoce (Coléno et Duru, 1999). De plus une surface importante favorise la constitution de stocks sur pied et permet de prolonger la durée du pâturage, quand bien même il y aurait ralentissement de la pousse de l'herbe. Il en est de même en ce qui concerne le pâturage d'été. Une telle relation signifie donc que les élevages diffèrent plus entre eux par la surface allouée que par la croissance de l'herbe.

Ce lien étroit entre les durées de consommation et les surfaces finales affectées montre que le dimensionnement final des surfaces au pâturage est piloté par la demande des animaux.

Le dimensionnement des surfaces de base de première coupe est à peu près équivalent pour quatre des sept éleveurs et correspond à une surface de 0,48 hectares par UGB. Il est un peu plus élevé chez Am avec 0,56 hectares par UGB, et un peu plus bas chez Me avec 0,35 hectares par UGB. Le référentiel fourrager indique une valeur moyenne de 0,50 hectares par UGB pour les systèmes ensilage et 0,60 pour les systèmes foin séché au sol. Le dimensionnement apparaît conforme aux préconisations des conseillers agricoles chez les autres si l'on considère que compte tenu des dates de fauche précoces du foin chez Ma il s'apparente plus à un système ensilage. Le dimensionnement semble néanmoins légèrement sous dimensionné chez Me.

Le dimensionnement des surfaces de base du regain est plus variable, il oscille entre 0 et 0,47 hectares par UGB. Me ne peut réaliser de regain à cause de la sécheresse estivale. Pour les autres, la variabilité du dimensionnement est à associer à l'importance des ajustements dans le cas de cet atelier, le dimensionnement des surfaces de base en est plus flou. Dans les systèmes présentant plusieurs modes de conservation des fourrages, le dimensionnement signalé correspond en grande partie à celui de l'atelier le plus précoce (Ch et Go notamment). D'une manière générale, le dimensionnement des surfaces de base des différents ateliers de

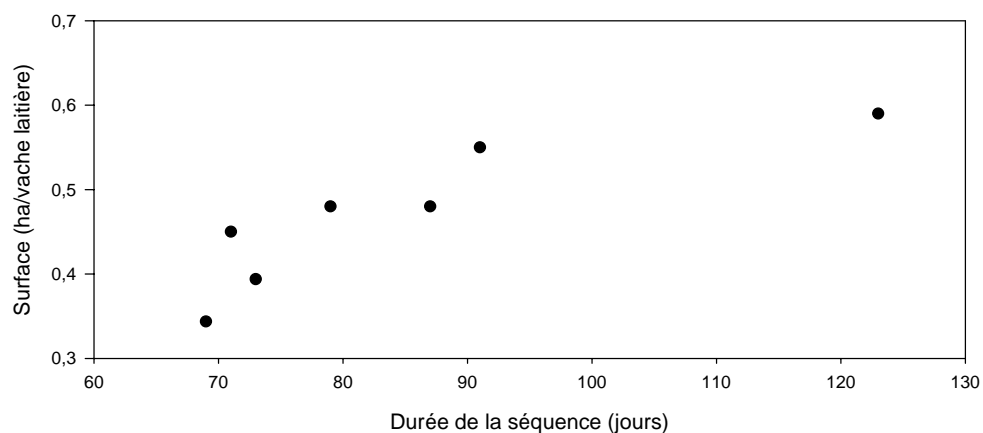


Figure 7 : Relation entre la surface de la séquence pâturage de printemps et sa durée

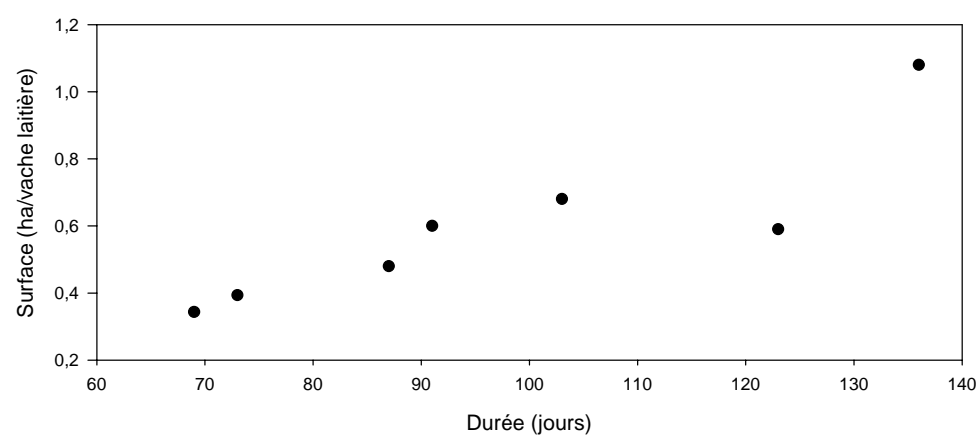


Figure 8 : Relation entre la surface au printemps (séquence de déprimage incluse) et la durée

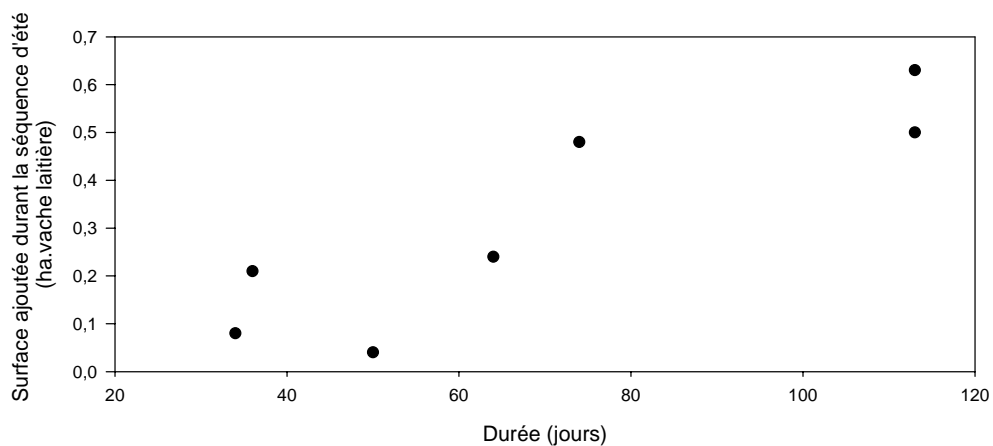


Figure 9 : Relation entre la durée de la séquence de pâturage d'été et l'élargissement de la surface de pâturage

production de stocks conservés dépend du rendement estimé sur les parcelles et de la part souhaitée de chaque aliment dans la ration hivernale des différents lots d'animaux.

Hormis chez Go, les surfaces finales affectées en 2002 aux ateliers de première coupe sont quasiment équivalentes et oscillent entre 0,50 et 0,56 hectares par UGB. C'est donc essentiellement la taille de l'atelier regain qui discrimine les éleveurs entre eux (figure 10).

La figure 11 met en évidence la relation entre la surface affectée au regain et la date de première coupe exprimée en somme des températures. Plus cette première coupe est tardive, moins importante est la surface affectée à l'atelier regain. Me, comme planifié, n'a pas réalisé de regain.

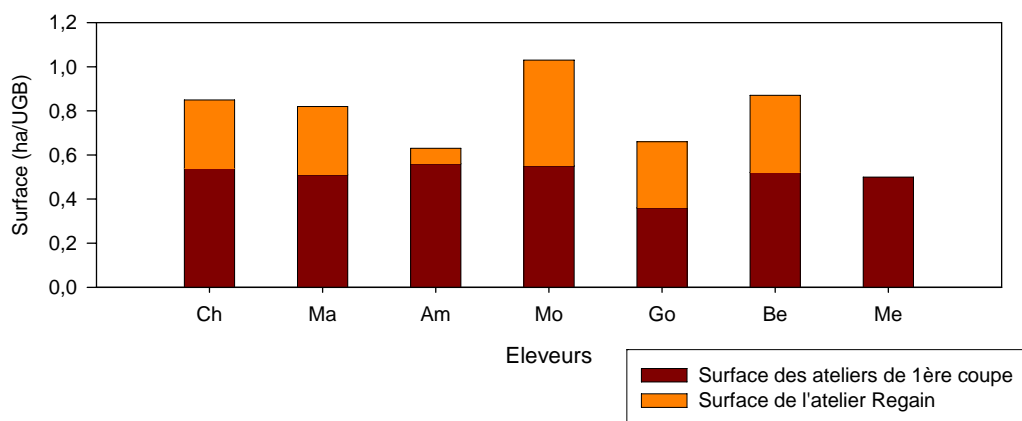


Figure 10 : Surfaces affectées aux ateliers de première coupe et au regain

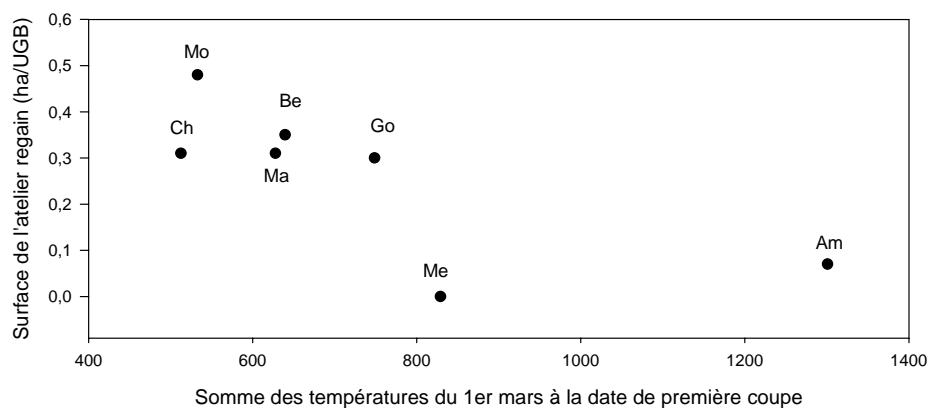


Figure 11 : Relation entre la date de première coupe et la surface affectée à l'atelier regain

Les modes de récolte tels que l'ensilage ou l'enrubannage permettent une première coupe précoce et par conséquent une surface importante en regain. Cependant au-delà du mode de récolte, la part souhaitée du regain dans l'alimentation hivernale du troupeau explique la précocité de la première coupe et par conséquent la surface affectée à l'atelier regain. En effet, chez Ma qui pratique le foin séché au sol, la récolte est aussi précoce que celle des systèmes enrubannage, ensilage ou foin ventilé car il projette de récolter beaucoup de surface en regain. Le regain constitue une part importante de l'alimentation hivernale des vaches laitières car il fournit un aliment de bonne qualité.

Ainsi d'une manière générale on constate une liaison entre dimensionnement des surfaces et besoins des animaux au pâturage ou dans la grange. Le référentiel fourrager constitue un bon estimateur des surfaces affectées aux différents ateliers même s'il ne rend pas compte des ajustements mis en œuvre par les éleveurs. Ceux-ci sont variables entre ateliers et éleveurs. Nous allons à présent nous intéresser à l'autre volet du dimensionnement : la période calendaire et la durée des différents ateliers.

B. Période calendaire et durée des différents ateliers

Nous présentons dans cette partie les dates d'occurrence en 2002 des événements bornant les ateliers (ou des séquences de l'atelier pâturage des vaches laitières). Ces dates sont déclenchées par des indicateurs mentionnés par les éleveurs lors des différents entretiens et précisées par le dépouillement des calendriers et les données climatiques de l'année 2002. Nous passons en revue les différents types d'ateliers rencontrés chez les éleveurs suivis : pâturage des vaches laitières, foin séché au sol, ensilage, enrubannage, foin ventilé, regain.

a) Atelier pâturage des vaches laitières

Pour cet atelier nous mentionnons les indicateurs déclenchant les deux événements bornant l'atelier : la mise à l'herbe et la rentrée à l'étable. La durée du déprimage lorsqu'il existe et des séquences de pâturage de printemps, d'été et d'automne sont présentées.

♦ Mise à l'herbe des vaches laitières

Malgré la diversité entre élevages des conditions de mise à l'herbe en 2002 (tableau 18), on constate deux caractéristiques communes : pas de pluie et une température maximale journalière relativement douce (supérieure à 10°C). Le jour de mise à l'herbe se situe au début, ou durant une séquence de plusieurs jours sans pluie. Mais ces conditions ne suffisent pas à provoquer la mise à l'herbe. La figure 12 montre que conformément aux observations des pré-enquêtes, l'altitude influe sur la date de mise à l'herbe. En effet, la mise à l'herbe en 2002 a été d'autant plus précoce que l'exploitation est située à basse altitude. Cependant, à altitude sensiblement égale, les dates de mises à l'herbe sont hétérogènes. Cela prouve que d'autres déterminants déclenchent la mise à l'herbe.

Tableau 18 : Conditions de température et de pluviométrie à la mise à l'herbe

	Pluie j	Pluie j-1	Pluie j+1	Tmax j	Tmax j-1	Tmax j+1
Be	Non	Non	Non	11	11	11
Go	Non	Oui	Non	22	13	17
Ch	Non	Oui	Non	14	10	11
Ma	Non	Non	Non	11	5	11
Am	Non	Oui	Non	16	16	14
Mo	Non	Non	Oui	12	10	10
Me	Non	Non	Non	10	4	14

Pluie j indique l'occurrence ou non de pluie le jour de la mise à l'herbe

Pluie j-1 indique l'occurrence ou non de pluie la veille du jour de mise à l'herbe

Pluie j+1 indique l'occurrence ou non de pluie le lendemain du jour de mise à l'herbe

Tmax j indique la température maximale du jour de mise à l'herbe

Tmax j-1 indique la température maximale la veille du jour de mise à l'herbe

Tmax j+1 indique la température maximale le lendemain du jour de mise à l'herbe

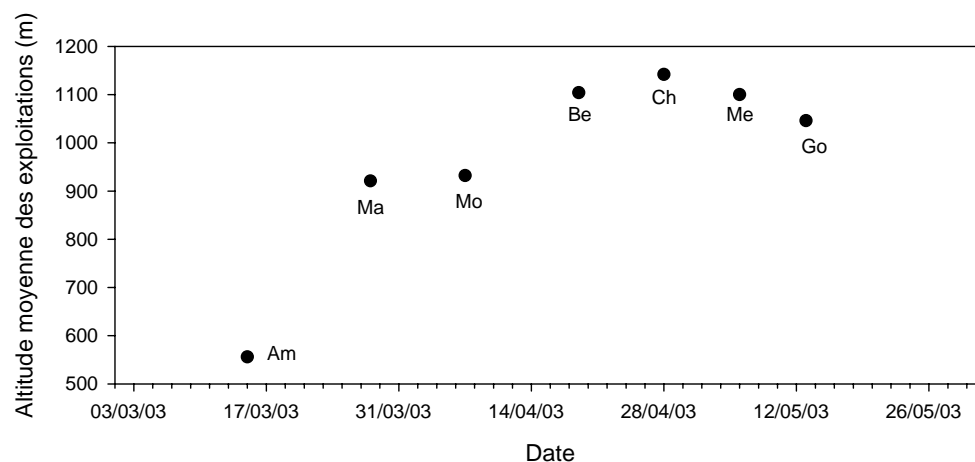


Figure 12 : Relation entre la date de mise à l'herbe et l'altitude

Ces facteurs sont variés. Chez Ma et Am, la mise à l'herbe est précoce afin de détecter les chaleurs. Elle peut avoir lieu dès que la parcelle la plus proche de l'étable est suffisamment portante. Le niveau des stocks n'est jamais limitant chez Ma et n'est pas pris en considération. Chez Am il n'a pas été limitant en 2002 mais peut l'être et contraindre à avancer la date de mise à l'herbe. Chez Go la nécessité de finir le silo peut retarder la mise à l'herbe. Chez Ch, Mo et Me la mise à l'herbe a lieu quand la parcelle proche du siège de l'exploitation est portante et qu'une hauteur d'herbe de 5 à 10 cm est atteinte. Chez Be, la hauteur d'herbe a peu d'importance car l'éleveur adapte la surface offerte à la demande. En 2002, l'ensemble des parcelles de pâturage proches de la stabulation a ainsi été offert en pâturage libre aux animaux car la pousse de l'herbe a pris du temps à démarrer. Cette pratique est possible car les parcelles de pâturage sont contiguës.

Au-delà des indicateurs de déclenchement des décisions et à travers des seuils de hauteurs d'herbe mentionnés par les éleveurs, il semble que les éleveurs réalisent une estimation des flux de production et de consommation des fourrages au pâturage et en stock comme l'avait constaté Duru *et al.* (1988a) à travers la notion de trésorerie fourragère. Il n'a cependant pas été facile de les faire s'exprimer sur cette estimation de trésorerie fourragère réalisée lors de la mise à l'herbe. En calculant a posteriori le nombre de jours de consommation d'avance au pâturage à partir des calendriers de pâturage (tableau 19), et hormis chez Ch (où le calcul est faussé à cause des distributions de foin au pâturage), on constate qu'à la mise à l'herbe il oscille entre 10 et 15 jours.

Tableau 19 : Nombre de jours d'avance (JA) à la mise à l'herbe (MH) des vaches laitières

	Be	Go	Am	Ch	Mo	Me	Ma
JA à la MH	12,41	14,71	10,72	34,55	11,61	12,15	13,22

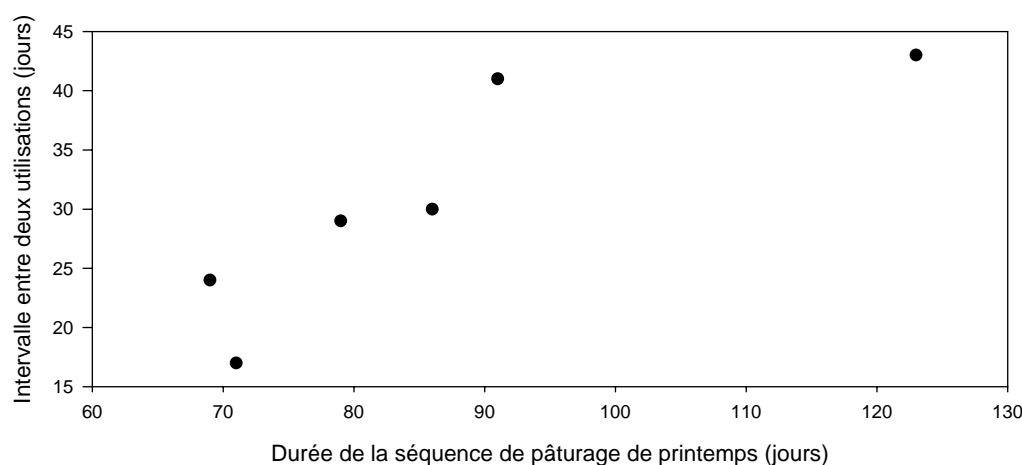
♦ Déprimage

Chez les éleveurs pratiquant le déprimage, le début de cette séquence a coïncidé avec la mise à l'herbe des animaux. Chez Be, le déprimage s'est achevé lorsque toutes les parcelles « déprimables » l'ont été. Chez Am, le déprimage n'est de manière générale pas réalisé au-delà du 20 mai pour ne pas affecter le potentiel de repousse des prés de fauche. Entre exploitations, la pratique du déprimage n'est pas systématique, elle dépend de la proximité

des parcelles de fauche, du rendement (important ou non) souhaité sur ces parcelles et de la surface disponible à la mise à l'herbe des animaux.

♦ La séquence de pâturage de printemps

Nous avons vu (section 2.3.1.1) qu'il existait une relation entre la durée du pâturage de printemps et la surface affectée à cette séquence. Cette durée est fonction de l'intervalle entre deux utilisations d'une même parcelle durant le printemps (figure 13). Plus le temps de repousse des parcelles est important et plus longue est la durée du pâturage de printemps. Ce temps de repousse varie entre éleveurs de 18 à 43 jours en fonction du nombre de parcelles et de la durée de séjour sur chacune d'entre elles (voir section 3.3.2).



* Un des éleveurs n'a pas été représenté (Me) car seul un passage a été réalisé sur les parcelles au printemps

Figure 13 : Relation entre l'intervalle entre deux utilisations d'une même parcelle et la durée de la séquence de pâturage de printemps (sans déprimage)

♦ Séquence d'été et d'automne

Le tableau 16 fait apparaître des séquences d'été ou d'automne plus ou moins longues et décalées dans le temps entre éleveurs.

Les animaux ne sont affectés aux repousses que lorsque la biomasse des parcelles de pâturage de printemps a été consommée et à condition qu'il y ait suffisamment de repousses sur les prés de fauche.

L'été, l'affectation la plus précoce des animaux aux prés de fauche a été constatée chez Mo (16 juin) suivie près d'un mois plus tard par Me (19 juillet), puis Am (28 juillet). Chez Ch, Ma et Go, elle était quasiment simultanée et est intervenue entre le 8 et le 10 août. Elle a été plus tardive chez Be (26 août).

Les dates d'élargissement des surfaces de pâturage s'expliquent par les dates de récolte (figure 14). Lorsqu'il existe plusieurs ateliers de première coupe, il peut s'agir des repousses de l'atelier le plus précoce, dans ce cas la mise à disposition est précoce, ou du plus tardif, dans ce cas la mise à disposition est tardive. Par exemple, chez Mo les repousses de certaines parcelles d'ensilage récoltées précocement sont offertes aux animaux. En revanche chez Be, seules les repousses de foin de première coupe sont offertes durant l'été (les repousses de l'atelier foin ventilé étant affectées à l'atelier regain).

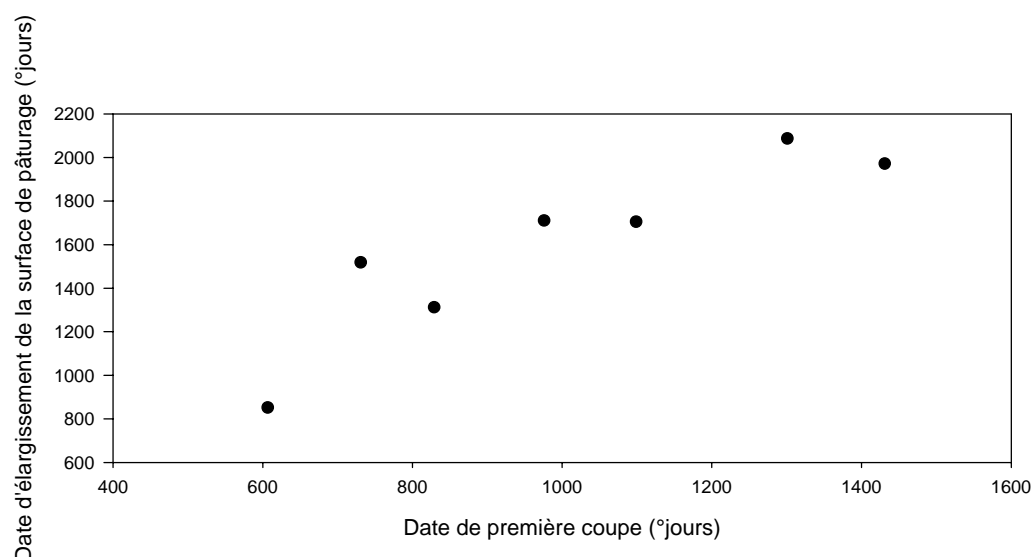


Figure 14 : Relation entre la date de première coupe de la première parcelle donnée aux vaches laitières l'été et la date d'élargissement de la surface de pâturage

Nous avons déjà signalé la relation existant entre la durée de la séquence de pâturage d'été et la surface qui lui est affectée (figure 9) en 2002.

Le tableau 16 fait apparaître des séquences d'été plus longues chez Me et Am puisque chez ces éleveurs, la quasi-totalité des repousses des ateliers « foin de première coupe » a été

offerte aux animaux l'été. Il n'y a par conséquent pas eu de séquence d'automne compte tenu du fait qu'il y a eu peu ou pas de regain permettant d'offrir aux animaux des repousses de regain à consommer l'automne. Chez Go ou Be la séquence d'été a été courte car une faible proportion des surfaces récoltées a été offerte aux animaux durant l'été, la grande majorité des repousses (et notamment la totalité des repousses des ateliers ensilage ou foin ventilé) étant récoltée en regain.

♦ Rentrée des animaux à l'étable

La rentrée à l'étable est intervenue durant la première décade de novembre chez quatre des sept éleveurs (Be, Go, Mo, Me) suivis et durant la dernière décade chez les deux autres (Am, Ch). La figure 15 présente les conditions météorologiques durant la première décade de novembre sur la station de Laqueuille. Ces conditions sont à peu près similaires sur les autres stations (à Marmanhac située à plus basse altitude, les températures maximales sont cependant plus élevées). On constate une dégradation des conditions climatiques durant la première décade de novembre correspondant à une chute des températures (les températures maximales sont inférieures à 10 °C) associée à des précipitations importantes. Ces conditions connaissent ensuite une légère amélioration avant de chuter à nouveau durant la dernière décade de novembre. Les conditions climatiques jouent donc un rôle essentiel dans la date de rentrée à l'étable. Les écarts constatés entre éleveurs sont à relier avec la quantité et la qualité des stocks sur pied, l'accessibilité des parcelles ou encore les périodes de reproduction. Chez Go et Be la rentrée à l'étable ne peut pas être trop tardive car les vêlages ont lieu à l'automne. Les problèmes d'accessibilité, tels que l'enneigement ou la portance des parcelles les plus proches de l'étable (un peu avant la rentrée, les animaux consomment plus spécifiquement l'herbe des parcelles proches de l'étable), peuvent précipiter la date de rentrée à l'étable bien qu'il y ait des stocks sur pied encore disponibles.

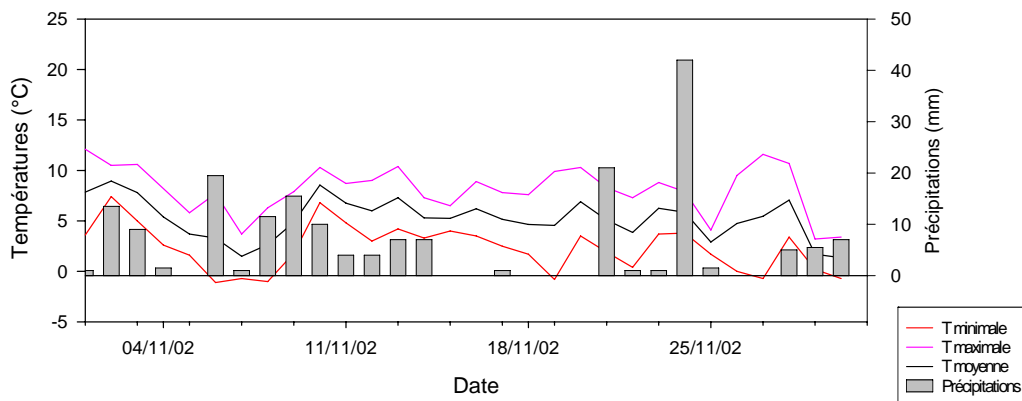


Figure 15 : Précipitations et températures du mois de novembre 2002 à Laqueuille

b) Atelier ensilage (Go, Mo)

Chez les deux éleveurs pratiquant l'ensilage, les indicateurs mobilisés pour le déclenchement de la récolte sont les mêmes : 3 jours sans pluie, stade fin montaison. La quantité d'herbe sur pied n'est pas citée comme un déterminant. La disponibilité des membres de la CUMA est prise en compte mais dans les deux cas ne constitue pas une forte contrainte. La récolte a eu lieu au cours du premier cycle de pâturage chez Go et à la fin de celui-ci chez Mo.

c) Atelier enrubannage/foin ventilé(Ch, Be, Mo)

Chez Ch et Be, la première coupe a eu lieu au stade début-montaison selon leurs déclarations lorsqu'une séquence de 2 (Ch) ou 3 (Be) jours sans pluie s'est présentée. Elle s'est déroulée durant le premier cycle de pâturage.

Chez Mo qui dispose de trois ateliers de première coupe (ensilage, enrubannage, foin séché au sol), le stade auquel l'herbe est récoltée est un peu plus tardif (épiaison) puisque cette récolte n'intervient qu'une fois l'ensilage terminé, et lorsqu'une séquence de 3 jours se présente. Chez ces éleveurs la quantité d'herbe sur pied n'est pas un indicateur de déclenchement de la coupe.

d) Atelier foin de première coupe

Dans les systèmes foin séché au sol, la récolte a lieu à 3 stades différents selon les déclarations des éleveurs : le début-montaison (Ma) l'épiaison (Me) et la floraison (Am) lorsqu'une séquence de 3 ou 4 jours se présente. Chez les deux premiers éleveurs la récolte est intervenue à la fin du premier cycle de pâturage.

Chez Am, la récolte tardive est due à une séquence de déprimage concernant une part importante de la surface fauchée (tableau 16). Chez Ma, la récolte est aussi précoce que celle réalisée dans des systèmes ensilage ou enrubannage et ne correspond pas aux pratiques les plus répandues en systèmes foin séché au sol (Réseaux d'élevage, 2001b). Cette récolte précoce est liée à la volonté de faucher une surface importante en regain pour avoir des stocks de meilleure qualité à distribuer durant l'hiver aux vaches laitières. Chez Me, un compromis est fait entre le stade et une certaine quantité d'herbe sur pied estimée à vue d'œil, puisqu'il n'y a pas de seconde coupe.

Dans les autres systèmes (Be, Mo, Go, Ch) la récolte du foin a généralement lieu lorsque les premiers chantiers de récolte (foin ventilé chez Be, ensilage et/ou enrubannage chez Go, Mo, Ch) sont terminés et qu'une séquence de 4 à 5 jours se présente.

e) Atelier regain

La fauche du regain a eu lieu quand la biomasse sur pied a atteint une hauteur seuil.

La quantité d'herbe sur pied est le principal déterminant exprimé par les éleveurs de la date de récolte. Le stade de l'herbe a dans certains cas été pris en compte (variétés à repousses reproductives). Pour cette récolte la séquence sans pluie nécessaire pour le séchage au sol est plus courte que celle des ateliers de première coupe et comprise entre 2 à 3 jours. Les éleveurs citent souvent une date limite de récolte au-delà de laquelle il est difficile de pouvoir faire sécher le regain à moins d'enrubanner ou ventiler la récolte.

Ainsi chez les éleveurs, on constate un certain nombre d'indicateurs communs déclenchant les principaux événements structurant la campagne. Le stock d'herbe disponible pour la mise à l'herbe, la pluviométrie pour la rentrée à l'étable, le stade ou la séquence de jours sans pluie pour les ateliers de première coupe. La valeur de ces indicateurs varie en fonction de la

structure de l'exploitation (mode de récolte, détection des chaleurs, nécessité de consommer les fourrages du silo...).

Nous faisons le point dans la section qui suit sur les ajustements du dimensionnement mis en œuvre. Ils concernent les durées des différents ateliers mais aussi leur surface.

2.3.1.2 Les ajustements du dimensionnement

Les différences entre surfaces de base et surfaces finales (section 2.3.1.1) illustrent la mise en œuvre d'ajustement par les éleveurs. Ces ajustements résultent de la mobilisation lors du pilotage des régulations planifiées.

Dans cette partie, avec l'éclairage du dimensionnement réalisé en 2002, mais aussi en nous basant sur les déclarations des éleveurs, nous tâcherons de mieux analyser à quel moment sont réalisés ces ajustements, sur quelles surfaces ils portent et quelles contraintes pèsent sur leur dimensionnement.

A. Les durées

La première enquête menée afin de caractériser la planification a montré que les éleveurs ne planifiaient pas de dates précises de début et de fin d'atelier. Ils pouvaient simplement, compte tenu de l'expérience passée, établir un intervalle de temps durant lequel il était probable que l'atelier débute où s'achève. Seuls semblaient planifiés les indicateurs de déclenchement des événements bornant la durée des ateliers. Chez certains éleveurs, des dates-seuils sont définies au-delà desquelles un événement donné ne peut avoir lieu sous peine de mettre en péril la suite de la campagne (par exemple chez Am, le déprimage s'arrête au plus tard le 20 mai car au delà de cette date il peut mettre en péril la réalisation de l'atelier foin). Les marges de manœuvre sur les dates sont donc relativement importantes puisque totalement dépendantes des conditions de l'année. Le suivi réalisé en 2002 a permis de mettre en évidence des indicateurs de déclenchement non cités lors de la première enquête. Ces indicateurs révèlent peut être une forme d'ajustement en cours d'année mais aussi une imprécision dans le questionnaire.

B. Les surfaces

Les ajustements des surfaces interviennent à des moments-clefs de la campagne. Lors de ces moments-clefs, l'éleveur réalise un diagnostic de la situation (besoin des animaux, jours d'avance au pâturage) et opère un arbitrage entre plusieurs ateliers pour l'affectation définitive des surfaces.

Les ajustements intervenant entre l'atelier pâturage des vaches laitières et les ateliers de production de fourrages stockés peuvent avoir lieu à trois périodes :

1. Au printemps, il y a un arbitrage entre l'affectation des surfaces tampons à la séquence pâturage de printemps ou aux ateliers de première coupe. Cet arbitrage intervient plus précisément après le premier cycle de pâturage puisqu'à ce moment, en fonction de la repousse sur les parcelles pâturées, l'éleveur sait s'il est nécessaire de pâturer une surface tampon ou si elle peut être fauchée. Les surfaces tampons de printemps affectées à la production de fourrages stockés, ont été fauchées au cours du 2^{ème} cycle de pâturage pour la plupart des éleveurs. Avant cette fauche, ils réalisent un bilan du stock d'herbe disponible pour les animaux.
2. A l'issue de la première coupe, les repousses des prés de fauche peuvent être affectées au pâturage d'été ou à l'atelier regain. L'affectation à l'atelier de pâturage équivaut à un élargissement de la surface de pâturage qui intervient lorsqu'il n'y a plus suffisamment de stock d'herbe disponible sur les parcelles de pâturage
3. Lorsqu'une troisième coupe est possible il y a arbitrage entre le pâturage d'automne et l'atelier regain.

L'arbitrage opéré par les éleveurs, porte sur un ensemble de parcelles pouvant avoir plusieurs fonctions. Deux caractéristiques sont en effet citées pour les surfaces tampons. Les surfaces tampons mobilisables au printemps ou durant l'été ou l'automne (repousses des prés de fauche) se caractérisent par :

- leur caractère fauchable qui rend possible un usage mixte (pâturage ou foin de première coupe par exemple) ;
- leur proximité aux parcelles de pâturage des vaches laitières (tableau 20).

Les autres composantes de la diversité ne rentrent donc pas en ligne de compte pour caractériser les surfaces tampons.

Ces surfaces tampons ne sont pas toujours clairement identifiées et notamment durant l'été où plusieurs parcelles (voire toutes les parcelles fauchées une fois) peuvent remplir cette fonction de parcelle tampon.

Tableau 20 : Distance moyenne des surfaces tampon au siège de l'exploitation (km)

	Go	Ma	Am	Mo	Me
Surfaces tampons	0,5	0,3	0,2	0,6	0,4
Atelier Pâturage	0,5	0,2	0,2	0,5	0,4
Atelier Foin de première coupe	1,2	1,9	0,5	0,8	0,8

Le nombre d'ajustements est contraint par la surface fauchable et la sécheresse estivale. Chez Be et Ch, les surfaces fauchables par UGB ont pour valeur respective 0,49 et 0,58 ha par UGB contre des valeurs supérieures à 0,75 ha par UGB chez les autres éleveurs. Chez ces deux éleveurs, la faible surface fauchable par UGB ne permet pas de prévoir des surfaces tampons mobilisables au printemps. Me lui, prévoit des parcelles tampons mobilisables au printemps. Mais l'été, l'ensemble de la surface est automatiquement offert aux animaux car la sécheresse estivale interdit une seconde coupe. Il n'y a donc pas d'ajustement possible pour Me.

Les arbitrages opérés mettent en évidence la hiérarchie existant entre les différents ateliers. Ainsi chez Am, l'atelier regain peut totalement disparaître une année donnée, parce que toutes les parcelles pré-affectées à cet atelier sont au final mobilisées par le pâturage.

Lorsqu'il y a plusieurs ateliers de première coupe (foin et ensilage, foin et enrubannage ou encore foin ventilé et foin séché au sol de première coupe), les arbitrages entre pâturage de printemps et stocks mobilisent toujours l'atelier « foin séché au sol de première coupe ». D'une année à l'autre, les surfaces de cet atelier peuvent augmenter en cas de pousse importante de l'herbe ou inversement diminuer en cas de pousse insuffisante. Cela est lié au fait que la coupe de foin séché au sol est plus tardive et peut intégrer les ajustements durant le premier cycle de pâturage. De plus la fonction de l'atelier le plus précoce étant de fournir un fourrage de qualité, ses surfaces sont fortement prédéfinies.

Les arbitrages pour l'affectation de parcelles à l'un ou l'autre des ateliers de production de fourrages stockés ne sont réalisés que dans les systèmes présentant des ateliers foin ventilé et enrubannage. Ces arbitrages s'observent dans trois cas de figure :

- en cas de grange ou de silo plein : enrubannage des parcelles affectées au foin ou à l'ensilage (Mo, Ch) ;
- en cas de pluie : enrubannage ou ventilation de parcelles pré-affectées au foin séché au sol (Be, Ch) ;
- en cas de récolte de regain ayant lieu tard dans la campagne : enrubannage ou ventilation des parcelles pré-affectées au regain (Be, Mo, Ch).

Dans le cas des ateliers ensilage, il existe une plus grande rigidité liée à la disponibilité du matériel de récolte et à la pente des parcelles (une parcelle fauchable peut ne pas être ensilable) qui rend difficile ce type d'ajustement entre ateliers de production de fourrages stockés.

Chez Be contraint par la surface fauchable par UGB, le déprimage a une fonction de tampon. Ainsi la séquence de déprimage des pâtures peut être très longue comme cela a été le cas en 2002 (1 mois) ou inexistante en cas de pousse d'herbe suffisante sur les parcelles de pâturage. Le déprimage a donc réellement un rôle d'ajustement de la pousse de l'herbe aux besoins des animaux ce qui n'est pas le cas chez Ma où la fonction du déprimage (qui est limité et ne concerne que les prés de fauche) est d'étaler la récolte.

Chez Am, le déprimage a une fonction hybride, il sert à la fois de tampon en permettant d'avoir suffisamment de surface pour la mise à l'herbe qui est très précoce mais permet aussi de retarder la récolte à une période plus favorable.

Malgré les contraintes de sécheresse estivale ou de surface fauchable pouvant limiter les capacités d'ajustement des éleveurs, ceux-ci sont systématiques (tableau 16). Seul Ch ne met pas en œuvre d'ajustements (ou alors très limités concernant l'enrubannage de parcelles affectées au foin ou au regain) et se distingue ainsi nettement des autres éleveurs suivis.

Les ajustements constituent donc bien une façon de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Nous n'avons pas pu déterminer de lien entre ces ajustements du dimensionnement et la diversité du territoire, les surfaces tampons se caractérisant uniquement par leur caractère fauchable et leur distance au siège de l'exploitation. Nous allons à présent étudier le rôle éventuel de la diversité du territoire d'exploitation dans la planification du calendrier ou des surfaces de base des ateliers.

2.3.1.3 Dimensionnement et diversité du territoire

Nous venons de voir comment peut être ajusté le dimensionnement ; dans cette section, nous nous intéressons au lien entre planification et diversité du territoire (en interaction ou non avec le climat). Nous étudions pour les deux volets du dimensionnement (durée et surfaces) comment la diversité du territoire influe sur leur planification.

A. Les durées

Les caractéristiques des parcelles affectées aux différents ateliers peuvent potentiellement influencer sur leur durée. Pourtant, dans le cas du pâturage, la diversité du territoire n'est pas mise à profit pour jouer sur la durée des séquences en retardant par exemple la rentrée des animaux à l'étable par l'affectation des animaux aux parcelles les plus portantes. Dans le cas du dimensionnement de l'atelier pâturage, cette diversité semble donc davantage subie qu'exploitée. En effet, la mise à l'herbe n'est effective que lorsque les conditions favorables à son déclenchement sont réunies sur les parcelles les plus proches du siège de l'exploitation.

Dans le cas des ateliers de production de fourrages stockés, cette diversité du territoire est plus concrètement prise en compte pour jouer sur la durée des ateliers : ainsi, chez Ch, comme la récolte d'enrubannage est précoce, elle est réalisée sur les parcelles exposées sud et situées aux altitudes inférieures (section suivante) de façon à terminer plus tôt le chantier de récolte que s'il s'agissait de parcelles exposées nord. Pour comprendre l'influence de la diversité du territoire sur la période calendaire des ateliers, il faut donc étudier plus en détail la nature des surfaces qui leurs sont affectées.

B. Les surfaces

Notre typologie initiale de la diversité du territoire dissocie la diversité du territoire influant sur la végétation, la production de biomasse ou son accessibilité, de celle sans interaction avec le climat (section 1 du chapitre 2). Cette typologie reste valable pour étudier le lien entre dimensionnement et diversité du territoire, cependant les types de végétation ont un statut différent des autres caractéristiques de la diversité du territoire.

a) Diversité des types de végétation

Les types de végétation ne sont pas cités par les éleveurs comme un déterminant de l'affectation des surfaces de base (hormis chez Mo). Or, le dépouillement des informations recueillies lors du tour de plaine, montre qu'il existe un lien entre le dimensionnement et les types de végétation. Il montre en particulier que le pâturage est le plus souvent réalisé sur des parcelles de type 3 à 5 et la production de fourrages stockés sur des parcelles de type 1 à 3 (figure 16). De façon encore plus détaillée on constate que les prairies de types 1 et 2 s'observent plus fréquemment dans les systèmes présentant un atelier de première coupe précoce et qu'au sein des parcelles de pâturage les prairies non fauchable sont préférentiellement de type 5. Bien que dans certains cas, les contraintes du milieu soient à l'origine des types de végétation constatés, dans plusieurs cas, ces types semblent davantage la conséquence du dimensionnement que leur déterminant. Cette hypothèse est conforme à l'observation de Moulin *et al.* (2001) « ce sont les facteurs d'utilisation qui engendrent des distinctions entre parcelles ». Chez Mo, les prairies temporaires de type 2 sont implantées sur des parcelles destinées à être ensilées. La relation de causalité entre dimensionnement et type de végétation est donc nette chez cet éleveur.

Nous avons calculé pour l'ensemble des parcelles visitées (tous éleveurs confondus) le coefficient de corrélation entre les types de végétation et des pratiques associées au dimensionnement : la nature de la première récolte, la date de première défoliation et la fertilisation (tableau 21, voir également annexe 5).

Tableau 21 : Corrélation entre type de végétation et pratiques

Pratiques	Type de végétation
Nature de la première défoliation	0,63***
Fertilisation	-0,52***
Date de première défoliation	0,26**

Les types de végétation sont corrélés significativement à chacun des 3 critères caractérisant les pratiques ; la corrélation la plus élevée étant observée avec la nature de la première défoliation. Cependant, lorsque les 3 critères sont considérés ensemble, seule la nature de la première défoliation apparaît significative. Lorsqu'on considère séparément les parcelles uniquement pâturées et celles fauchées au moins une fois, les pratiques de fertilisation ne sont pas significativement corrélées avec le type de végétation, et seule la date de première

utilisation est significativement corrélée ($p < 0.05$) dans le cas des parcelles uniquement pâturées.

L'analyse au niveau du réseau de parcelles montre ainsi la relation entre les types de végétation et les différences de pratiques. De plus, à l'échelle de l'exploitation nous avons vu que lorsque le territoire d'exploitation est relativement homogène il présente une diversité de type de végétation non négligeable (section 2.2 et tableau 15). L'ensemble de ces éléments laisse penser que ce sont les pratiques et donc le dimensionnement qui sont à l'origine des types de végétation.

Si le type de végétation apparaît davantage comme une conséquence du dimensionnement, les autres caractéristiques parcellaires sont un déterminant majeur des surfaces affectées aux différents ateliers.

b) Altitude, exposition, distance au siège de l'exploitation, pente

Contrairement au type de végétation, les autres caractéristiques parcellaires sont citées par les éleveurs comme des déterminants de la nature des parcelles affectées aux différents ateliers. Cependant les caractéristiques des parcelles pertinentes dans les décisions d'affectations diffèrent d'un atelier à l'autre.

♦ Atelier pâturage des vaches laitières

Lorsque la surface fauchable par UGB est limitante (Ch, Be), l'ensemble des surfaces fauchables est affecté à la production de fourrages stockés (section 2.2). C'est alors le caractère fauchable ou non de la parcelle qui va déterminer son affectation au pâturage. Lorsque la surface fauchable est moins limitante c'est la distance au siège de l'exploitation qui détermine la nature des parcelles affectées à cet atelier.

La figure 17 issue du dépouillement des informations du tour de plaine, montre que hormis pour deux éleveurs qui possèdent des salles de traites mobiles (Ch, Be), les vaches laitières ont accès à des parcelles très proches du siège de l'exploitation (distance moyenne au siège de l'exploitation inférieure à 0,5 km). Les vaches de Be et Ch sont contraintes de pâturer des

parcelles éloignées (à cause de la dispersion des parcelles non fauchables) d'où le recours à la salle de traite mobile.

Chez les éleveurs suivis, les chargements sont relativement équivalents. C'est donc la structure du territoire d'exploitation et plus précisément la surface fauchable par UGB qui détermine les seuils de distance accessibles par les animaux. Plus la surface fauchable par UGB est faible, plus les seuils de distance accessibles par les vaches laitières seront importants. La surface fauchable par UGB permet ainsi de distinguer les parcelles de pâturage des vaches laitières de celles des animaux à l'entretien (pour Go, Ma, Am, Me et Mo, ce seuil de distance est inférieur ou égal à 0,5 km). La distance au siège de l'exploitation détermine alors la surface accessible au pâturage par vache laitière et donc la place du pâturage dans l'alimentation des animaux. Les entretiens confirment le rôle important de la distance au siège de l'exploitation pour l'affectation des parcelles au pâturage des vaches laitières.

♦ Atelier enrubannage/foin ventilé (Ch, Be, Mo)

A cause de leur influence sur la précocité, les surfaces affectées à ces ateliers sont les mieux exposées ou situées à plus basse altitude (tableau 22). La précocité a une importance primordiale puisqu'il existe en moyenne un mois de décalage entre le début de la récolte du premier atelier de production de fourrages stockés (foin ventilé ou enrubannage) et le début de la récolte de foin de première coupe (tableau 16). On constate par exemple que chez Be, les parcelles de foin ventilé sont à plus basse altitude que les parcelles de foin au sol de première coupe et que pour ces dernières, la proportion de surface exposée sud est plus importante.

La distance joue également un rôle puisque comparativement aux parcelles de foin de première coupe, les parcelles de l'atelier le plus précoce sont plus proches du siège de l'exploitation. Les parcelles de foin au sol chez Be sont situées à une distance moyenne supérieure à 1 km plus loin du siège de l'exploitation que les parcelles de foin ventilé.

Chez Mo, l'enrubannage a un statut particulier, les parcelles affectées à cet atelier ne se distinguent des parcelles de foin que par leur portance.

♦ Atelier ensilage (Go, Mo)

Dans le cas de l'ensilage, les caractéristiques sans interaction avec le climat (pente, taille, forme) jouent un rôle important pour des raisons liées au matériel de récolte. Pour les mêmes raisons, les parcelles les plus portantes des prés de fauche sont affectées à l'ensilage.

♦ Atelier foin de première coupe

Dans les systèmes foin séché au sol, la distance des parcelles au siège de l'exploitation et leur topographie (les plus plates des parcelles fauchables) sont déterminantes. Dans les autres, l'atelier foin séché au sol est associé à un atelier plus précoce (ensilage, foin ventilé ou enrubannage) et nous avons vu dans ce cas là l'importance de la précocité et de la distance. Les parcelles de foin séché au sol sont alors les plus isolées ou éloignées ou encore les plus tardives à cause de leur exposition nord et /ou altitude élevée (tableau 22). La portance n'est pas une caractéristique déterminante puisque la récolte a lieu à une période de la campagne où les problèmes de portance se posent moins qu'en début de campagne.

Tableau 22 : Altitude et exposition des parcelles affectées aux différents ateliers de production de stocks chez les éleveurs ayant plusieurs modes de conservation des fourrages

Eleveur	Be		Ch		Go		Mo		
Atelier	FV	FS	Enr	FS	E	FS	E	Enr	FS
Altitude moyenne (m)	1085	1159	1127	1150	1043	1040	939	907	907
Exposition nord (%)	35	58	0	18	-	-	0	0	0
Exposition sud (%)	65	42	100	82	-	21	0	44	43
Autre exposition (%)	0	0	0	0	100	79	100	56	57

♦ Atelier regain

Lorsqu'il existe plusieurs ateliers de première coupe, le regain est prioritairement réalisé sur les parcelles de l'atelier le plus précoce (tableau 23) choisies en fonction de l'altitude ou l'exposition. Ainsi par exemple, chez Go ou chez Be, la quasi-totalité des parcelles ensilées

ou ventilées est affectée à l'atelier regain et les repousses de l'atelier foin, affectées au regain ou pâturées selon les besoins. Ceci confirme la relation déjà signalée entre la date de première coupe et la surface affectée au regain (figure 11).

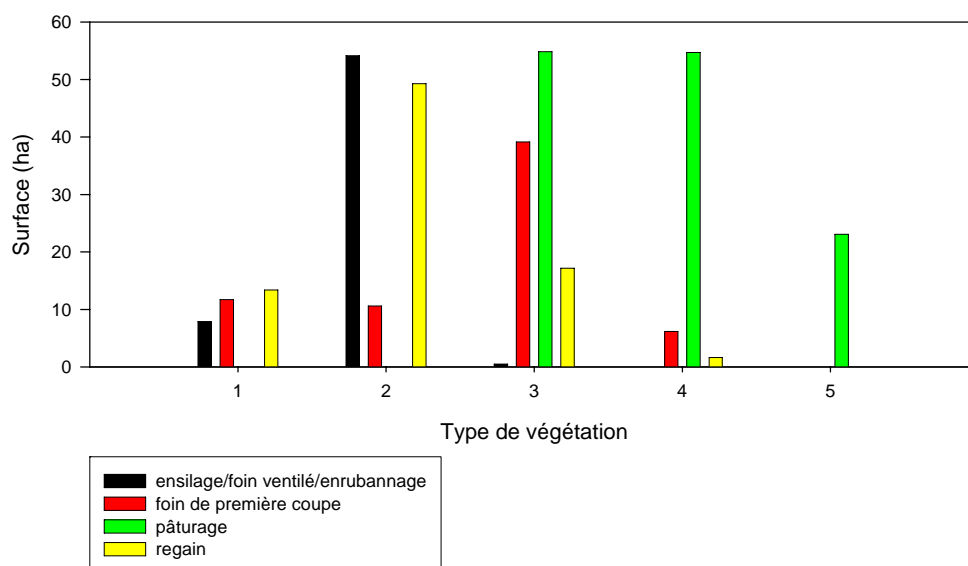


Figure 16 : Répartition des surfaces (tout éleveur confondu) en fonction du type de végétation

Tableau 23 : Pourcentage de la surface des ateliers de première coupe affecté au regain

	Foin ventilé, Ensilage ou Enrubannage	Foin au sol
Ch	82	44
Mo	63	52
Be	100	22
Go	100	42

Outre l'utilisation préalable de la parcelle, la distance de la parcelle au siège de l'exploitation joue un rôle important (figure 17). En effet le regain est souvent réalisé sur les parcelles les plus éloignées auxquelles n'ont pas accès les vaches laitières ainsi que sur les parcelles les plus productives (liée à l'exposition dans certains cas) quelle que soit leur distance au siège de l'exploitation.

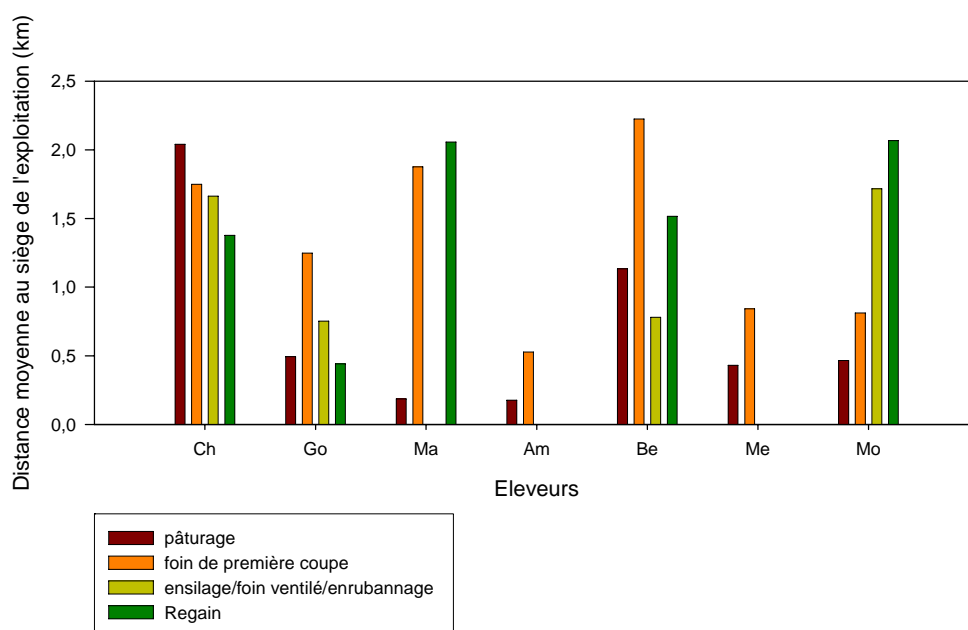


Figure 17 : Distance moyenne au siège de l'exploitation des différents ateliers

c) Niveaux de prise en compte de la diversité du territoire d'exploitation

La prise en compte de la diversité sans interaction avec le climat relève de contraintes d'organisation du travail (déplacement des animaux, contraintes matérielles pour l'ensilage,...). L'altitude ou l'exposition sont prises en compte pour leur effet sur la phénologie et la production de biomasse. Il en résulte que les modes de prise en compte de la diversité du territoire sont différents d'un atelier à l'autre et peuvent être caractérisés par un algorithme tel que présenté sur la figure 18. Ainsi dans le cas des ateliers pâturage ou ensilage, la diversité pour son rôle tampon face aux aléas climatiques est moins déterminante que la diversité sans interaction avec le climat (distance, surface, forme). Certains systèmes fourragers sont donc plus enclins à mettre à profit la diversité du territoire que d'autres. Cependant si cette prise en compte peut être associée aux caractéristiques de l'atelier, elle est également dépendante du territoire d'exploitation. Ma et Go prennent peu en compte la diversité tout simplement parce qu'elle n'est pas suffisamment marquée pour être mise à profit. D'autres caractéristiques (notamment la distance au siège de l'exploitation) sont en revanche suffisamment marquées pour être plus déterminantes.

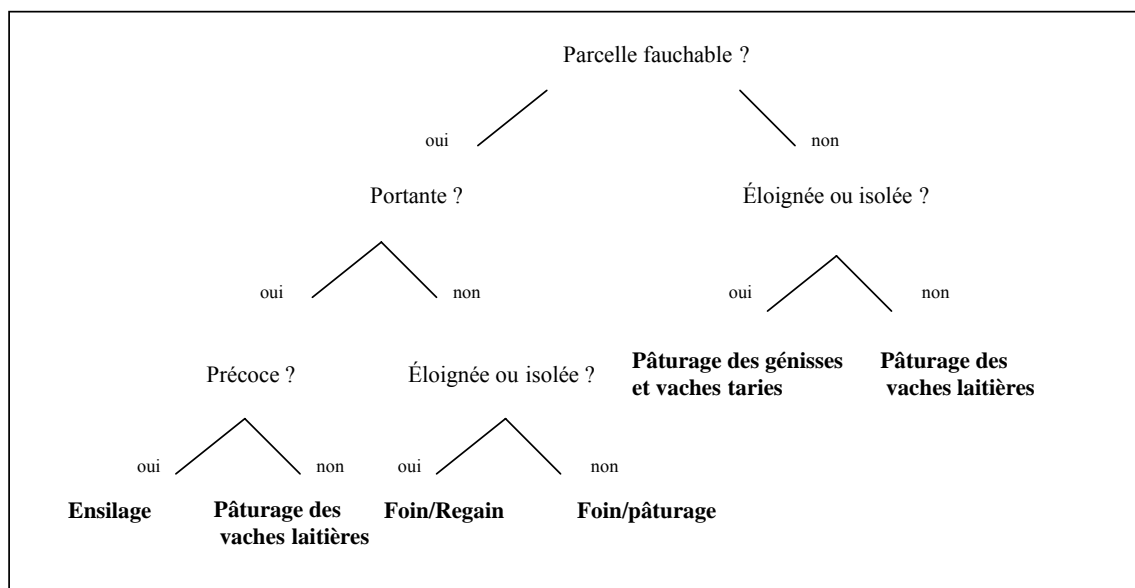


Figure 18 : Pré-affectation des parcelles à un usage selon ses différentes caractéristiques, cas d'un système ensilage et d'une faible proportion de la SAU non fauchable

2.3.1.4 Les animaux en croissance ou à l'entretien

Hormis le lot des vaches laitières, on distingue dans ces élevages 2 à 4 lots d'animaux en croissance ou à l'entretien.

A. Dimensionnement des ateliers de pâturage des animaux en croissance ou à l'entretien

D'un élevage à l'autre, on constate des similitudes dans la conduite des lots d'animaux à l'entretien ou en croissance en ce qui concerne :

- les dates de mises à l'herbe et de rentrée à l'étable ;
- la nature des parcelles qui leur sont affectées ;
- les durées de séjour sur les parcelles.

a) Les génisses de moins d'un an

C'est le lot mis à l'herbe le plus tardivement. Chez tous les éleveurs, il est affecté à une parcelle proche de la stabulation.

b) Les génisses de plus d'un an

La mise à l'herbe est tardive chez Be, Go, Mo, Me ou Ma car elle a lieu sur des parcelles éloignées pour lesquelles il n'y aura pas de possibilité de faire rentrer les génisses en cas d'intempéries. De plus sur ces parcelles, la pousse de l'herbe est tardive (prairies de type 4 ou 5). Chez Am, l'organisation du travail retarde la mise à l'herbe des génisses. Chez Ch, les génisses sont mises à l'herbe précocement afin de limiter les quantités de stocks consommées et réaliser la mise à l'herbe des vaches laitières dans de bonnes conditions.

Chez Mo, Go, Ma ou Am, elles consomment durant l'automne les repousses des prés de fauche les plus éloignés ou difficile d'accès. Chez Ch, elles consomment les parcelles des vaches laitières.

c) Les vaches tarées

D'effectif réduit ce lot a accès chez Be, Mo, Ch, Ma à des parcelles de petites surfaces auxquelles ne pourrait être affecté le lot des vaches laitières.

Elles consomment en outre les refus des vaches laitières chez Go ou Ma .

B. Ajustements du dimensionnement permis par les lots d'animaux en croissance ou à l'entretien

Les possibilités d'ajustement sont limitées dans la mesure où les parcelles affectées aux animaux à l'entretien se distinguent nettement de celles des animaux en production. Nous avons vu que ces animaux avaient accès soient à des parcelles très petites ou éloignées auxquelles accèdent difficilement les vaches laitières. Ces animaux peuvent cependant

permettre de réguler un surplus d'herbe à l'automne sur les parcelles pâturées par les vaches laitières.

L'utilisation du territoire d'exploitation par les génisses de moins d'un an répond à des contraintes de surveillance. Pour les autres lots d'animaux, l'utilisation du territoire est un enjeu davantage pour maîtriser l'embroussaillage que les aléas climatiques.

Il semble alors que dans la phase de construction du modèle on puisse ignorer ces lots d'animaux.

2.3.2 L'ordonnement

Dans cette section nous étudions la deuxième composante de l'utilisation du territoire : l'ordonnement d'ateliers. Nous analyserons dans un premier temps l'ordonnement établi par les éleveurs en 2002 (section 2.3.2.1). Nous étudierons ensuite le lien entre les ajustements de l'ordonnement et la diversité du territoire (section 2.3.2.2). Nous analyserons enfin les compétitions qui peuvent se poser à l'échelle de l'atelier entre les contraintes de travail et la prise en compte de la diversité du territoire (section 2.3.2.3).

2.3.2.1 L'ordonnement réalisé en 2002

L'ordonnement des différents ateliers a été reconstitué à partir des calendriers de pâturage et confronté aux caractéristiques du territoire et aux explications des éleveurs. Nous précisons pour l'atelier pâturage des vaches laitières le mode de conduite ainsi que les décisions d'entrée et de sortie des parcelles. Pour les ateliers de production de fourrages stockés, les parcelles sont fauchées les unes après les autres tant que la chaîne de récolte et qu'une séquence de jours sans pluie suffisante le permettent. Nous présentons donc simplement l'ordre d'utilisation compte tenu de la capacité de la chaîne de récolte.

A. Atelier pâturage des vaches laitières

a) Conduite du pâturage

La conduite du pâturage diffère entre éleveurs (tableau 24). Chez Am le pâturage est libre, favorisé par le regroupement des parcelles autour du siège de l'exploitation. Les parcelles ne sont pas clôturées et les animaux passent librement d'une parcelle à l'autre. Les parcelles se distinguent alors plus par leurs caractéristiques ou la présence d'obstacles (talus, chemin) que par leur utilisation. Deux parcelles peuvent être simultanément consommées par les animaux. En 2002, les durées d'utilisation des parcelles constatées étaient courtes avec des durées de repousses également courtes au printemps comme durant l'été.

Chez les autres éleveurs, le pâturage est tournant. En 2002 deux cycles de pâturage ont été effectués au printemps (un chez Me). Chez Mo, Go, Ch, Ma le pâturage tournant est effectué sur 3 à 10 parcelles avec des durées de séjour longues et des temps de repousses allant de 24 à 42 jours pour le premier cycle.

Chez Be, le pâturage tournant concerne 12 parcelles. En 2002, les durées d'utilisation étaient courtes et les temps de repousse longs.

Durant l'été les animaux sont affectés de façon quasi exclusive aux repousses des prés de fauche pour le pâturage de jour.

Tableau 24 : Conduite du pâturage de printemps en 2002

Eleveurs	Type de pâturage	Nombre de cycles au printemps	Durée des cycles de printemps	Temps de séjour moyen sur une parcelle
Ma	Tournant sur 8 parcelles	2	59-58	7-7
Ch	Tournant sur 3 parcelles	2	26-45	9-13
Mo	Tournant sur 6 parcelles	2	29-33	5-5,5
Go	Tournant sur 6 parcelles	2	48-40	8-7
Be	Tournant sur 12 parcelles	2	43-45	3,5-3,5
Me	Tournant sur 10 parcelles	1	60	6
Am	libre	-	-	-

b) Décision d'entrée et de sortie des parcelles

Les indicateurs d'entrée et de sortie diffèrent en fonction du mode de conduite du pâturage. Chez Am les animaux peuvent circuler librement d'une parcelle à l'autre.

Chez les éleveurs pratiquant le pâturage tournant (tableau 24), la décision de sortie d'une parcelle est déclenchée lorsque la biomasse sur cette parcelle est consommée (hormis Go). Les animaux sont alors affectés à la parcelle suivante. Une hauteur moyenne de sortie de 5 cm a été citée par ces éleveurs (nous nous sommes basés sur les déclarations des éleveurs et non sur des mesures) qui correspond à un rabatement homogène du tapis herbacé. Chez Go, la décision de sortie est fonction de la quantité et la qualité de l'herbe sur la parcelle suivante, les génisses consomment les éventuels « refus » des vaches laitières.

c) Choix de la parcelle suivante

Le choix de la parcelle à pâturer et donc l'ordre d'utilisation des parcelles de pâturage dépend principalement de la distance au siège de l'exploitation (tableau 25). La proximité entre parcelles influe également sur cet ordre. Cela signifie que les parcelles sont pâturées de proche en proche en partant du siège de l'exploitation pour s'en éloigner progressivement. Chez les éleveurs ne disposant pas de salle de traite mobile, la distance au siège de l'exploitation est déterminante, puisque le lot des vaches laitières réalise des allers-retours matin et soir entre le lieu de pâturage et l'étable. Seuls deux éleveurs intègrent d'autres critères (portance chez Mo et âge de la repousse chez Am). L'ordonnancement de l'atelier pâturage est donc susceptible de varier selon la portance ou la production de biomasse des parcelles une année donnée. Si l'on prend l'exemple de Mo, la mise à l'herbe a lieu sur la parcelle la plus proche du siège de l'exploitation. Le choix de la deuxième parcelle pâturée se fait en fonction de la portance : il y a arbitrage entre deux parcelles situées de part et d'autre du siège de l'exploitation. Ce choix est primordial pour la suite du pâturage puisqu'une fois la parcelle choisie, elle va orienter le choix des parcelles suivantes, pour des questions de proximité. L'éleveur planifie donc un ordonnancement prévisionnel et un ordonnancement de rechange à mobiliser en cas de problème de portance qui évite à l'éleveur de distribuer du foin en attendant qu'un état plus favorable s'installe sur la parcelle.

Il en résulte que l'ordre d'utilisation des parcelles de pâturage en 2002 est conjoncturel chez les deux derniers éleveurs alors qu'il est susceptible d'être identique d'une année à l'autre chez les cinq autres éleveurs.

Tableau 25 : Les déterminants du choix de la parcelle suivante

	Pâturage des vaches laitières	Premier atelier de récolte (Foin ventilé, Ensilage ou Enrubannage)	Foin au sol	Regain
Be	Distance coïncidant avec le gradient altitudinal	Exposition et altitude	Exposition et altitude	Ordre de première coupe
Go	Distance	Néant (2)	Distance	Ordre de première coupe
Ch	Distance	Altitude et exposition	Altitude et exposition	Ordre de première coupe
Ma	Distance	(1)	Distance	Ordre de première coupe
Am	Distance et production de biomasse	(1)	Distance, altitude, accès des parcelles	Ordre de première coupe
Me	Distance	(1)	Séquence sans pluie, altitude	(1)
Mo	Portance et distance	Néant	Distance	Néant

B. Ateliers de production de fourrages stockés

Lorsque les chaînes de récolte permettent de faucher une surface importante (Go et Mo), des règles d'ordonnancement ne sont pas nécessaires car les parcelles sont toutes récoltées en un jour (tableau 26).

Tableau 26 : Surface maximale fauchée par jour (ha)

Eleveurs	Me	Am	Ma	Be	Go	Ch	Mo
Premier atelier de récolte	(1)	(1)	(1)	6	10	4	14
Foin au sol	4	5	4	6	10	4	4

(1) Les cases sont grisées lorsque l'atelier n'existe pas

(2) *Néant* signifie que tout est récolté en un jour

Pour les autres ateliers de première coupe, la diversité du territoire en interaction avec le climat est prise en compte dans la planification de l'ordonnancement (tableau 25). On distingue néanmoins deux cas de figure. Lorsque l'ordre établi est fonction de la précocité, il ne fait pas l'objet d'ajustements car cet ordre est stable entre années. Lorsque sont considérés

des critères plus conjoncturels (séquence sans pluie, vents, portance,...), différents ajustements sont possibles et l'ordonnancement établi en fin de campagne est fonction des conditions de l'année. Dans le premier cas, l'ordonnancement 2002 est donc le produit strict d'une planification tandis que dans le deuxième, il est le résultat du pilotage en fonction des conditions climatiques de l'année.

Pour les ateliers « regain », l'ordre reproduit celui de première coupe puisqu'il détermine le moment où est atteint une biomasse-seuil déclenchant la fauche du regain.

Pour les ateliers de production de fourrages stockés comme pour le pâturage des vaches laitières, des ajustements de l'ordonnancement prévisionnel peuvent être réalisés. Nous les étudions plus en détail dans la section qui suit.

2.3.2.2 Les ajustements de l'ordonnancement et la prise en compte de la diversité du territoire

Les entretiens menés en cours de campagne ont mis en évidence le fait que pour certains ateliers, l'ordonnancement réalisé en 2002 était sensiblement identique à celui réalisé les années précédentes alors que pour d'autres il était variable en fonction des années. Quatre types d'ajustements de l'ordonnancement peuvent être construits en fonction de ce caractère variable entre années de l'ordonnancement des différents ateliers. Les ajustements du dimensionnement sont indépendants de la diversité du territoire en interaction avec le climat. Dans le cas de l'ordonnancement, nous verrons qu'ils dépendent du niveau de diversité du territoire de l'exploitation ainsi que de la souplesse des règles de décision mobilisées par l'éleveur.

A. Type 1 : ordre des ateliers de production de stocks conservés variable (Me et Be)

Chez Me l'ordre de fauche varie en fonction de la pluviosité de début de campagne de façon à limiter le risque de mouiller la récolte. La campagne de fauche peut débuter lorsque que l'herbe a atteint le stade épiaison. En cas de début de campagne de fauche pluvieux, l'éleveur commence par récolter les petites parcelles pour éviter de mouiller de trop grosses quantités de foin en récoltant les plus grandes parcelles. Il retarde ainsi la récolte des grandes parcelles

à une période plus favorable. En cas de début de campagne non pluvieux, il commence par la parcelle la plus basse en altitude puis progresse en fonction du gradient altitudinal.

Chez Be l'ordre de fauche est adapté à la production de biomasse sur les parcelles. Celle-ci est susceptible de varier d'une année à l'autre.

B. Type 2 : ordre de l'atelier pâturage des vaches laitières variable (Mo, Am)

Chez ces deux éleveurs, l'ordonnancement varie en fonction de la portance (Mo) ou de la pousse de l'herbe de l'année (Am). Chez Am, une parcelle qui était pâturée la première une année donnée à cause d'une biomasse plus importante, peut être pâturée parmi les dernières l'année suivante parce que sa biomasse aura été moins abondante que sur d'autres parcelles. En effet la production de biomasse dépend de facteurs climatiques tels que la température, le rayonnement, la pluviométrie. La fluctuation entre années de l'un de ces facteurs va se traduire par une variabilité de la pousse de l'herbe de plus ou moins grande ampleur entre parcelles en fonction de leurs caractéristiques (profondeur de sol, exposition...), d'où un ordonnancement susceptible de varier.

C. Type 3 : ordre de tous les ateliers constant (Ch)

L'ordonnancement des différents ateliers est très précisément établi avant la campagne et ne fait pas l'objet d'une modification en cours de campagne. L'ordonnancement des différents ateliers est essentiellement déterminé par l'altitude ce qui permet d'intégrer des contraintes d'organisation du travail et les caractéristiques structurelles du milieu.

Cet éleveur se caractérise déjà par des ajustements limités du dimensionnement que nous avons attribués aux contraintes parcellaires (section 2.3.1.2). Cependant le fait que cet éleveur ne modifie pas non plus l'ordonnancement illustre une volonté assez marquée de simplifier la prise de décision en reproduisant *a priori* chaque année la même conduite des surfaces. Be présente lui aussi de fortes contraintes parcellaires (dispersion et près de 50% de la SAU non fauchable), mais il ajuste l'ordonnancement et le dimensionnement (quoique dans ce dernier cas les ajustements soient contraints durant le printemps). La main d'œuvre plus limitante chez Ch peut expliquer cette volonté de simplifier la prise de décision.

D. Type 4 : des variations mineures de l'ordre au sein des ateliers (Go, Ma)

Chez ces éleveurs, la distance des parcelles au siège de l'exploitation est le principal déterminant de leur ordre d'utilisation. Les ajustements de l'ordonnancement constatés résultent de la mobilisation des surfaces tampons et ne constituent pas un ajustement de l'ordonnancement en tant que tel.

Dans le type précédent, l'absence d'ajustements de l'ordonnancement est liée à une volonté de simplifier la prise de décision, ici, elle est davantage en relation avec la structure du territoire. Les territoires d'exploitation des deux éleveurs concernés présentent une diversité des types de végétation. Mais, ceux-ci sont davantage déterminés par les pratiques que par le milieu (section 2.3.1.3). Leur territoire présente en revanche un faible gradient altitudinal par rapport aux autres éleveurs, qui explique l'absence d'ajustement de l'ordonnancement.

E. Facteurs structurels et conjoncturels pour déterminer l'ordonnancement

L'identification de ces types montre que les ajustements de l'ordonnancement varient au sein d'une exploitation entre ateliers mais également entre éleveurs.

Les ajustements réalisés, s'expliquent par deux facteurs :

(1) La diversité du territoire

Il faut une certaine diversité inter-parcellaire pour que soient pertinentes des variations de l'ordre d'utilisation des parcelles. Chez Go, et Ma la faible diversité du territoire explique probablement que ces éleveurs n'ajustent pas l'ordonnancement. Dans le cas d'un pâturage tournant, Mathieu et Fiorelli (1990) soulignaient déjà la nécessité de prairies présentant des caractéristiques différentes pour pouvoir jouer sur les temps de repousses.

(2) Le type de facteur permettant à l'éleveur de hiérarchiser ses parcelles

L'éleveur peut ordonner ses parcelles en fonction par exemple de la distance, la phénologie, la production de biomasse ou l'accessibilité.

Certains de ses facteurs sont structurels car stables au cours du temps (distance, phénologie) et d'autres conjoncturels car variables (production de biomasse et accessibilité) (figure 19). En d'autres termes, une parcelle exposée sud, sera chaque année plus précoce qu'une parcelle

exposée nord, alors que la biomasse produite sur la première ne sera pas systématiquement plus importante que celle de la deuxième.

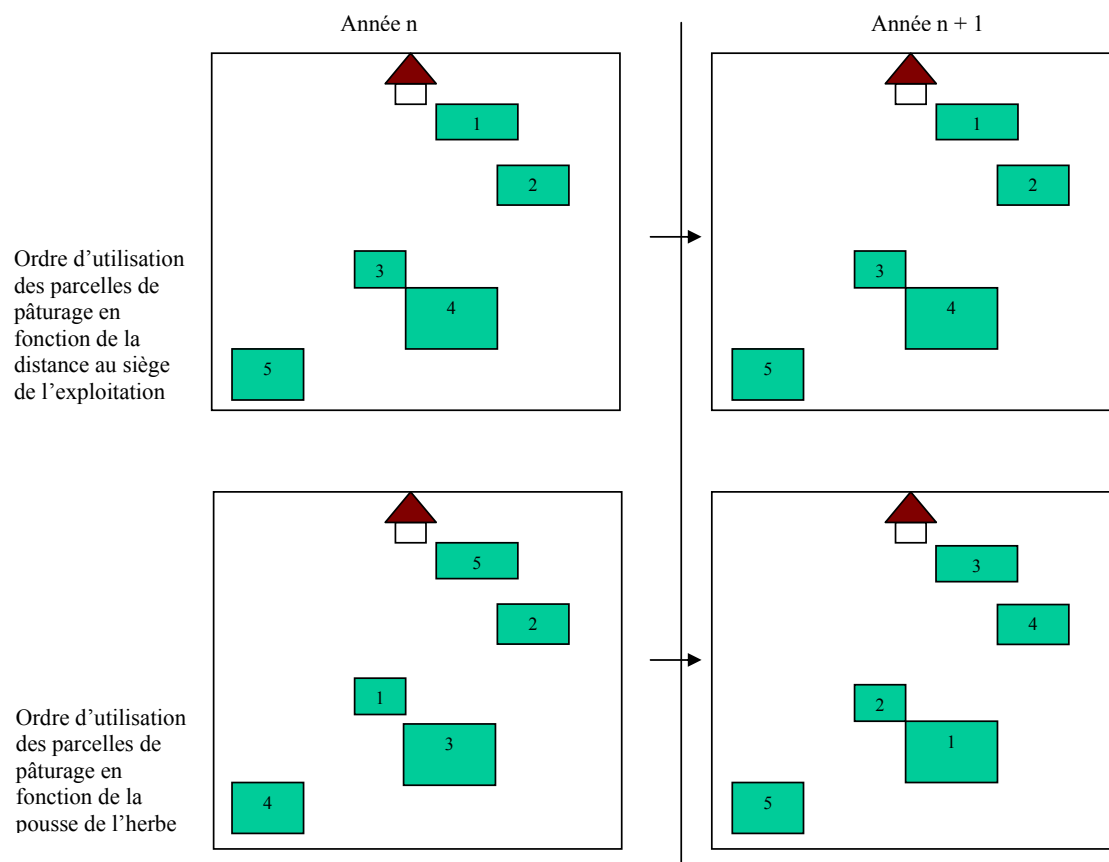


Figure 19 : Exemple de prise en compte de facteurs structurels ou conjoncturels pour planifier l'ordonnancement

A l'échelle du territoire de l'exploitation, classer les parcelles en fonction de leur phénologie ou leur distance au siège de l'exploitation équivaut à établir un ordonnancement stable dans le temps quelles que soient les conditions climatiques. Un classement en fonction de la production de biomasse ou de l'accessibilité des parcelles induit un ordonnancement susceptible de varier dans le temps en fonction du climat.

Planifier l'ordonnancement en fonction de la distance ou de la phénologie ne nécessite donc pas la mise en œuvre d'ajustements. Dans le cas d'une prise en compte de la production de

biomasse ou de l'accessibilité l'éleveur détermine un ordre prévisionnel en fonction d'une année moyenne ainsi que des ajustements de cet ordre en cas d'aléas. Prendre en compte des facteurs conjoncturels suppose donc de privilégier le pilotage en cours d'année.

Entre les ateliers d'une exploitation, les règles d'affectation de surfaces sont donc plus ou moins souples en fonction du type de facteur pris en compte.

De même, entre éleveurs, la souplesse des règles diffère. Ainsi Ch et Be ont des diversités du territoire équivalentes, qui dans les deux cas leur permettrait d'ajuster l'ordonnancement. Le premier accorde une plus grande importance aux facteurs structurels alors que le deuxième privilégie la conjonction entre les conditions de l'année et les aléas. Ainsi ces différences témoignent pour le deuxième éleveur d'une plus grande importance des règles de pilotage au pâturage ; cet éleveur privilégiant l'adaptation du plan chemin faisant (Girard et Hubert, 1997), il ajuste l'ordonnancement.

Les ajustements de l'ordonnancement témoignent d'une capacité d'adaptation aux aléas climatiques plus directement liée à la diversité du territoire en interaction avec le climat que dans le cas des ajustements du dimensionnement. Cette capacité d'adaptation peut cependant être en contradiction avec les contraintes de travail au sein de l'atelier.

2.3.2.3 Diversité du territoire *versus* travail

L'ordre d'utilisation des parcelles de pâturage révèle des contraintes d'organisation du travail. Pour faciliter le travail, les éleveurs privilégient dans certains cas la proximité, en particulier pour le pâturage. Organisation du travail au sein de l'atelier et prise en compte des effets du climat rentrent donc en compétition pour déterminer l'ordonnancement.

L'ordonnancement planifié est dans certains cas un compromis entre des contraintes d'ordre organisationnel et la volonté de tamponner les effets du climat via la prise en compte de la diversité du territoire. Par exemple, chez Am, l'ordonnancement de l'atelier foin est justifié pour les premières parcelles récoltées par leur précocité et pour les dernières par des problèmes d'accès. Lorsque comme chez Ch, l'éleveur intègre le gradient altitudinal dans ses règles d'ordonnancement, il articule ainsi à la fois des contraintes d'organisation du travail et le facteur climatique.

Ajuster l'ordonnancement en fonction des conditions de l'année (comme chez Mo par exemple), n'est pas incompatible avec l'organisation du travail. En effet, pour l'atelier

pâturage des vaches laitières chez Mo, une fois l'arbitrage effectué entre les deux parcelles situées de part et d'autre du siège de l'exploitation, le choix des parcelles suivantes est dicté par la proximité. Mais ceci montre que, dans le cas du pâturage, les ajustements de l'ordonnancement, pour ne pas être incompatibles avec l'organisation du travail, sont déterminés dans une gamme de distance donnée.

2.4 Identification de stratégies d'utilisation du territoire et schématisation du sous-système décisionnel

Les sections 2.3 et 2.4 montrent une diversité des pratiques d'affectation entre exploitations : diversité des indicateurs de décision mobilisés, des ajustements mis en oeuvre, des modes de prise en compte de la diversité du territoire. Il convient au-delà de cette diversité de construire une typologie permettant de caractériser les éleveurs suivis. En effet, l'enjeu principal du suivi est, à partir de l'analyse des décisions, de proposer des stratégies virtuelles d'utilisation du territoire à comparer par modélisation. Ces stratégies doivent constituer la composante décisionnelle du modèle à articuler avec la composante biophysique. De la typologie retenue doit découler l'écriture des différentes stratégies.

Après avoir décrit cette typologie (sections 2.4.1 et 2.4.2), nous présentons les stratégies qui en découlent (section 2.4.3) et la structure générale du sous-système décisionnel (section 2.4.4).

2.4.1 Dimensionnement, ordonnancement et mode de récolte

Dans la définition de l'échantillon des exploitations à suivre, le mode de récolte avait été considéré comme susceptible d'induire des règles d'utilisation du territoire différentes.

Lors du suivi, nous avons constaté que le mode de récolte, lorsqu'il permet des fauches plus précoces, influe sur les surfaces affectées à l'atelier regain (section 2.3.1.1). Il influe également sur les dates de mise à disposition des repousses aux vaches laitières et par conséquent sur la durée des différentes séquences de pâturage.

En fonction du mode de récolte, une priorité différente est accordée aux caractéristiques parcellaires (section 2.3.1.3). Dans le cas de l'ensilage, le dimensionnement privilégie les

caractéristiques sans interaction avec le climat (taille de la parcelle, portance). Alors que pour les systèmes foin ventilé et enrubannage, l'altitude et l'exposition sont considérées.

Chez Ch et Be, les modes de récolte foin ventilé et enrubannage apparaissent surtout comme une réponse aux nombreuses contraintes parcellaires rencontrées qui rendraient difficiles la réalisation de l'ensilage ou du foin séché au sol. Le dimensionnement de ces ateliers est donc en étroite relation avec la structure du territoire d'exploitation. Ces modes de récolte influent également sur l'ordonnancement compte tenu notamment de la capacité de la chaîne de récolte.

En revanche, ces modes de récolte ne reflètent pas de stratégies spécifiques pour limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. En effet, si l'on se réfère par exemple aux ajustements du dimensionnement, ils ne sont pas plus importants dans les systèmes foin séché au sol que dans les systèmes ensilage. Compte tenu de la question de recherche, distinguer les exploitations selon leur mode de récolte ne paraît pas suffisant. Nous proposons plutôt une distinction selon les ajustements mis en œuvre.

2.4.2 Les types d'ajustements de l'utilisation du territoire et la diversité du territoire

Les ajustements du dimensionnement et de l'ordonnancement identifiés dans les sections 2.3.1.B et 2.3.2.B sont présentés par les éleveurs comme des adaptations de l'utilisation du territoire en fonction des aléas climatiques. Plutôt qu'une distinction des exploitations en fonction de leur mode de récolte, nous avons décidé de réaliser une typologie selon la nature des ajustements mobilisés par les éleveurs :

- type 1 : ajustements du dimensionnement uniquement (Go et Ma);
- type 2 : pas d'ajustements prévus (Ch);
- type 3 : ajustements du dimensionnement et de l'ordonnancement (Me, Be, Mo, Am).

Ces types ne sont pas associés à un mode de récolte donné. Ils ne semblent pas influencer sur les quantités de surfaces affectées ou sur les durées des différents ateliers.

En revanche ils sont associés à un niveau de diversité du territoire et à une souplesse de l'utilisation du territoire (tableau 27). Gras *et al.* (1989) définissent la souplesse d'un système de production comme l'aptitude à faire face aux perturbations (section 2.2.4 du chapitre 3).

Elle nécessite une planification de régulations et une capacité de pilotage. La souplesse de l'utilisation du territoire se traduit par les ajustements mis en œuvre par l'éleveur.

Tableau 27 : Types d'ajustements, souplesse de l'utilisation du territoire et diversité du territoire d'exploitation

		Souplesse de l'utilisation du territoire	
		Oui	Non
Territoire diversifié	Oui	Type 3	Type 2
	Non	Type 1	- (1)

(1) Aucun des éleveurs suivis ne correspond à la case inférieure du tableau.

Le type 1 se caractérise par une souplesse de l'utilisation du territoire, mais un territoire peu diversifié en termes d'altitude et d'exposition. La faible diversité du territoire n'autorise que des ajustements du dimensionnement et non de l'ordonnancement puisque ces derniers nécessitent un territoire d'exploitation plus diversifié (section 2.3.2.2).

Les deux types suivants sont associés à des territoires d'exploitation plus diversifiés mais la nature des règles mobilisées pour la conduite du système fourrager diffère.

Dans le type 2, les pratiques sont finement adaptées à la diversité du territoire (l'altitude et de l'exposition déterminent à la fois l'ordre d'utilisation des parcelles ainsi que la nature des parcelles affectées aux différents ateliers) mais ne font pas l'objet d'ajustements. Le dimensionnement ou l'ordonnancement établi est donc *a priori* constant d'une année à l'autre. Ce type d'éleveur privilégie la planification initiale de son système fourrager. A cet effet, il mobilise plus de règles de planification que de pilotage. Ce type est à rapprocher des systèmes observés lors des pré-enquêtes que nous avons qualifiés de rigides ou de « concepteurs de voiliers » (Hubert *et al.*, 1995). Ce type correspond également à une volonté de simplifier la prise de décision. Le système fourrager est alors davantage conçu pour s'adapter à n'importe quelle année, au-delà des aléas. Dans ce système, l'utilisation du territoire est donc adaptée à la diversité du territoire mais pas souple face aux aléas climatiques.

Le type 3 ajuste à la fois le dimensionnement et l'ordonnancement. Pour ce type, l'utilisation du territoire est la plus souple. L'éleveur de ce type met à profit la diversité conjoncturelle du territoire d'exploitation. Pour reprendre l'analogie de Hubert *et al.*, (1995) il s'agit de « barreaux » qui évoluent au gré des événements et mobilisent beaucoup de règles de pilotage. Une bonne définition des indicateurs de décision est alors nécessaire pour le pilotage.

A l'échelle d'un suivi annuel on ne peut évaluer la sensibilité des systèmes fourragers associés à ces types (section 1.3 du chapitre 1). On peut toutefois supposer que ces 3 types sont susceptibles d'induire une sensibilité différente du système fourrager aux aléas climatiques. Dans le type 1, la mobilisation de surfaces tampons permet d'ajuster l'offre fourragère à la consommation des animaux et de réduire la sensibilité aux aléas climatiques.

Dans le type 2, la simple mise à profit de l'aptitude des prairies à subir des taux de prélèvements instantanés variables (Duru *et al.*, 1998) peut ne pas être suffisante pour permettre l'adaptation de l'offre à la demande d'où une possible dégradation de la ressource et un plus grand recours aux intrants (concentrés, fertilisation). Le manque de souplesse de l'utilisation du territoire chez cet éleveur a un coût puisque l'éleveur concerné mobilise plus de concentrés que les autres pour compenser les conséquences par exemple d'une production d'herbe insuffisante.

Dans le type 3, les ajustements de l'ordonnancement permettent de limiter les quantités de foin distribuées au pâturage ou de ne pas prendre de retard sur les dates de récolte afin d'assurer une récolte de regain importante. Les règles de décision mobilisées sont plus élaborées.

Ces types sont tous associés à une diversité des types de végétation (sauf Am) à cause des pratiques mises en œuvre (section 2.3.1.3). Parce que le territoire d'exploitation du type 1 est peu diversifié, les seules caractéristiques prises en compte sont la distance ou le caractère fauchable des parcelles. Pour les types 2 et 3, en plus de l'exposition ou l'altitude, ces caractéristiques sans interaction avec le climat sont également prises en compte dans la définition des surfaces de base et de l'ordonnancement prévisionnel. Cela permet de conclure que la diversité du territoire, pour son rôle tampon face aux aléas climatiques, joue un rôle important dans la pré-affectation des parcelles, mais les autres caractéristiques parcellaires et en particulier la distance au siège de l'exploitation ne peuvent être ignorées dans le cadre de la modélisation.

Si ces types se distinguent par leurs ajustements, ils reflètent bien une structure différente des corps de règles à partir desquels on peut élaborer des stratégies à comparer par modélisation. Ces stratégies regroupent l'ensemble des règles de décision régissant l'utilisation du territoire durant la campagne.

2.4.3 Définition des stratégies d'utilisation du territoire à comparer par modélisation

Afin de tester notre hypothèse centrale qui consiste à évaluer l'intérêt d'une prise en compte de la diversité du territoire pour limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques, il nous faut comparer une ou plusieurs stratégies mettant à profit la diversité du territoire à une stratégie témoin ne la mettant pas à profit. Nous avons décidé de nous inspirer des types 1 et 3 précédemment identifiés pour définir ces stratégies. Néanmoins, en ce qui concerne le type 1 et afin qu'il puisse servir de support à l'élaboration de la stratégie témoin, nous avons décidé de nous écarter quelque peu de la réalité. Nous avons vu que les types 1 et 3 dépendaient du niveau (faible ou non) de diversité du territoire d'exploitation. Mais pour quantifier l'intérêt d'une mise à profit de la diversité, il faut gommer cette relation et étudier ce qui se passe lorsque qu'il n'y a pas de mise à profit. Plutôt que de considérer que les stratégies sont fonction de la diversité du territoire comme c'est le cas pour les types identifiés, nous considérons qu'elles diffèrent par la prise en compte de la diversité du territoire. En d'autres termes nous « dé-corrélons » des facteurs qui le sont dans la réalité. Ainsi, pour un territoire d'exploitation identique, une stratégie inspirée du type 1 (la stratégie 1) privilégie par exemple la distance et le caractère fauchable des parcelles dans ses règles de dimensionnement et d'ordonnancement. Une stratégie inspirée du type 3 (la stratégie 3) prend en compte d'autres caractéristiques telles que l'exposition et l'altitude des parcelles.

La comparaison de stratégies inspirées des types 1 et 3 permet d'étudier l'intérêt d'une prise en compte de la diversité du territoire dans les règles de dimensionnement et d'ordonnancement. Pour dissocier ce qui relève du dimensionnement de ce qui relève de l'ordonnancement et renseigner plus finement nos deux hypothèses de travail (section 2 du chapitre 2), nous proposons de tester une stratégie (la stratégie 2) non observée à savoir : « prise en compte de la diversité du territoire dans la planification du dimensionnement et ajustements du dimensionnement ». Cette stratégie se distingue de la stratégie 3 par le fait que la prise en compte de la diversité n'intervient que pour le dimensionnement. Sa comparaison avec la stratégie 1 permet donc de rendre compte de l'intérêt d'une prise en compte de la diversité dans les règles de dimensionnement ; sa comparaison avec la stratégie 3 permet d'identifier l'intérêt d'une prise en compte de la diversité du territoire également dans les règles d'ordonnancement (tableau 28).

Tableau 28 : Les stratégies testées et leur prise en compte de la diversité dans les règles d'utilisation du territoire

	Prise en compte de la diversité dans les règles de dimensionnement		
		Oui	Non
Prise en compte de la diversité dans les règles d'ordonnancement	Oui	Stratégie 3	-
	Non	Stratégie virtuelle : stratégie 2	Stratégie 1

Il ne paraît pas utile de modéliser une stratégie inspirée du type 2 d'une part parce que nous ne pouvons multiplier les cas à tester, d'autre part parce que même si la diversité du territoire est finement prise en compte, les régulations face aux aléas climatiques résultent pour beaucoup du recours aux concentrés.

Les types identifiés sont indépendants des modes de récolte (section 2.4.4). Parmi les systèmes étudiés lors du suivi, les systèmes fourragers foin séché au sol présentent *a priori* la sensibilité aux aléas climatiques la plus importante. Dans le contexte d'adoption des cahiers des charges AOC dans lequel nous avons réalisé les enquêtes, les systèmes foin séché au sol connaissent un regain d'intérêt. Nous proposons de mener la comparaison des stratégies pour ces systèmes. Cela signifie qu'au sein des stratégies, les ateliers modélisés ainsi que les indicateurs déclenchant les décisions sont inspirés des systèmes foin séché au sol suivis.

2.4.4 Structure générale du modèle décisionnel

Selon Aubry *et al.* (1998), malgré la variabilité inter-annuelle des pratiques mises en œuvre par l'éleveur, on peut construire un schéma général qui les rend partiellement prédictibles. A travers la mise en évidence (notamment grâce à la caractérisation de la planification de la campagne) des règles générales de fonctionnement du système fourrager, le suivi permet de proposer un schéma-type valable entre années mais également entre éleveurs.

Il est ainsi possible de proposer une structure générale du modèle décisionnel, les stratégies comparées étant calquées sur cette structure (elles seront détaillées dans le chapitre 6).

Le modèle décisionnel n'est pas destiné à reproduire l'ensemble des règles d'utilisation du territoire dans toute leur complexité et leur finesse. La grille de lecture des enquêtes

(structuration en ateliers, règles de dimensionnement et d'ordonnancement) constituait un premier niveau de simplification du processus décisionnel. Le travail de modélisation nécessite un niveau supplémentaire de simplification.

En permettant la décomposition du système de production, le cadre d'analyse utilisé pour étudier de façon empirique les systèmes fourragers, paraît pertinent pour rendre compte des décisions d'utilisation du territoire (section 3 du chapitre 1). Nous avons donc choisi de conserver ce cadre pour concevoir le modèle décisionnel.

Le modèle décisionnel est donc structuré en ateliers fourragers répondant à une demande imposée par le troupeau.

Les trois types d'ateliers fourragers observés dans les systèmes « foin séché au sol » sont alors représentés : l'atelier foin de première coupe, l'atelier regain et l'atelier pâturage. L'atelier pâturage est subdivisé en trois séquences « printemps », « été », « automne » se distinguant par le type de ressources qu'elles mobilisent (parcelles de pâturage, repousses de foin de première coupe, ou de regain).

Au cours de ces séquences il y a compétition pour l'attribution des parcelles au pâturage ou à la production de fourrages stockés. Ces compétitions sont gérées par l'existence de surfaces tampons. C'est grâce à elles que le modèle décisionnel peut réguler en cours d'année la surface des ateliers en fonction des aléas climatiques : elles peuvent être affectées au pâturage en cas de pousse de l'herbe insuffisante et au foin en cas de pousse importante.

Au sein du modèle décisionnel, chacun des ateliers fourragers est régi par des règles de dimensionnement et d'ordonnancement. Ces règles relèvent pour certaines de la planification, c'est à dire de la prévision de la campagne et pour d'autres du pilotage, c'est à dire de la mise en œuvre de cette planification compte tenu des aléas climatiques de la campagne. Nous présentons ces règles dans la section suivante.

2.4.4.1 Schéma général des règles de dimensionnement et d'ordonnancement à modéliser

Pour déterminer la nature des règles de décision à modéliser nous nous sommes basés sur les invariants entre éleveurs. En d'autres termes, nous avons cherché à sortir du cas particulier pour nous baser sur ce qui avait de commun aux éleveurs.

Compte tenu du cadre retenu pour modéliser les règles de décision de l'éleveur, la planification du dimensionnement consiste à pré-affecter des parcelles aux différents ateliers fourragers en précisant :

- la surface à affecter à chaque atelier pour assurer les besoins animaux estimés au pâturage (ateliers de pâturage) ou pour l'hiver (ateliers de stocks) ;
- la nature des parcelles à prendre en considération (en fonction de leurs attributs) pour atteindre cet objectif ;
- la durée de ces ateliers.

Pour les trois stratégies testées, la surface ainsi que la durée planifiées pour les ateliers sont identiques. En effet, les types ayant inspiré ces stratégies ne semblent pas être en relation avec ces deux composantes des règles de dimensionnement (section 2.4.2). En revanche, les stratégies vont se distinguer par la nature des parcelles à prendre en considération. Ainsi la diversité du territoire est mise à profit dans le dimensionnement des stratégies 2 et 3 mais pas dans celui de la stratégie 1. Cependant, pour rendre compte du lien existant entre les pratiques de défoliation et les types de végétation (section 2.3.1.3), quelle que soit la stratégie testée, les parcelles de foin de première coupe ou de regain sont associées aux types de végétation 1, 2 ou 3 et les parcelles de pâturage aux types 4 et 5.

En ce qui concerne la surface à affecter à chaque atelier, le suivi a montré que même si la structure de l'exploitation (la surface fauchable par UGB en particulier) peut influencer le dimensionnement des surfaces de base, les ordres de grandeurs des surfaces des différents ateliers sont conformes à ceux du référentiel fourrager (section 2.3.1.1). Les valeurs indiquées dans ce document sont donc utilisées pour le dimensionnement. Il s'agit de valeurs moyennes de production (rendement du foin de première coupe, durée de l'hiver, part de l'aliment dans la ration hivernale) à partir desquelles le modèle décisionnel peut estimer une offre moyenne permettant de dimensionner les surfaces de base.

En ce qui concerne la durée des ateliers, le suivi montre que les éleveurs ne planifient pas de dates précises de début ou de fin d'un atelier (section 2.3.1.2) mais disposent d'indicateurs de déclenchement des événements les bornant. Ainsi, dans le modèle, l'atelier foin de première coupe est délimité dans le temps par la date de fauche de la première et de la dernière parcelle qui lui avaient été pré-affectées durant la planification. Le suivi a démontré l'influence systématique de deux indicateurs pour la fauche : le stade phénologique, la séquence sans pluie (section 2.3.1.1). Le stade phénologique visé varie cependant d'un éleveur à l'autre et va

du début-montaison à la floraison. L'éleveur fauchant les parcelles à la montaison (Ma) pratique un mode de défoliation proche de celui des systèmes ensilage ou enrubannage. En système foin séché au sol, le stade de fauche se situe plus vraisemblablement entre l'épiaison et la floraison, nous l'avons fixé à environ 3 semaines (exprimées en sommes des températures) avant la floraison. La séquence sans pluie nécessaire à la fauche du foin se situe entre 3 et 5 jours. Ces deux valeurs sont retenues dans le modèle : avant le 15 juillet (fixé arbitrairement) 5 jours sans pluie sont nécessaires, après cette date seulement 3 jours sont nécessaires. La quantité d'herbe sur pied est un indicateur cité chez un éleveur. On suppose qu'il s'agit d'un indicateur mobilisé par tous les éleveurs mais de façon plus implicite, car lorsque que les deux premières conditions sont réunies (stade et séquence sans pluie), elles sont souvent associées à une biomasse suffisante pour la fauche. Nous avons fixé cette quantité à 3 tonnes de matière sèche par hectare. Les indicateurs pris en compte dans le modèle sont donc la séquence sans pluie, le stade et la quantité d'herbe sur pied.

Dans le modèle décisionnel l'atelier regain n'intervient qu'après la récolte de foin de première coupe et est également borné par la date de fauche de la première et de la dernière parcelle qui lui avaient été pré-affectées. Les éleveurs suivis mobilisent pour cette fauche deux indicateurs de décision : une séquence sans pluie de 2 ou 3 jours et la quantité d'herbe sur pied. Dans le modèle décisionnel une séquence sans pluie de 3 jours et une quantité de matière sèche de 3 tonnes par hectare sont retenues.

L'atelier pâturage est borné par la mise à l'herbe à la rentrée des animaux à l'étable, les séquences au sein de cet atelier étant délimitées par les dates de mise à disposition des repousses de foin de première coupe et de regain. Les facteurs de mise à l'herbe cités par les éleveurs étaient nombreux (consommation des stocks, détection des chaleurs,...). Mais au sein de ces facteurs deux nous paraissent plus généraux : la portance et le nombre de jours d'avance au pâturage. Ces deux indicateurs sont donc pris en compte par le modèle, le nombre de jours d'avance étant fixé à 15 (section 2.3.1.1).

Le suivi a montré que la rentrée à l'étable est déterminée par la portance et les conditions de températures. La qualité et la quantité d'herbe sur pied jouent également un rôle non négligeable notamment à cause de leur influence sur la production laitière. Dans la mesure où notre étude se focalise sur les ateliers fourragers, nous envisageons de modéliser de façon grossière la composante animale à travers la demande en matière sèche qu'elle impose aux ateliers fourragers. La production laitière n'étant pas modélisée, la qualité et la quantité d'herbe sur pied ne sont pas prises en compte. En revanche, la portance et les conditions de

températures sont considérées. Pour ces conditions de températures, une séquence de trois jours durant lesquels les températures moyennes sont inférieures à 0°C est l'indicateur retenu.

La planification détermine en outre les surfaces tampons qui peuvent potentiellement être utilisées par l'atelier mais dont l'affectation finale n'est fixée qu'à l'issue du pilotage. Le suivi a démontré l'influence de la surface fauchable par UGB dans le dimensionnement des surfaces tampons de printemps (section 2.3.1.2). Ainsi lorsqu'il n'y a pas suffisamment de surface fauchable disponible, il n'y a pas de surfaces tampons planifiées. Dans le modèle décisionnel, le dimensionnement des surfaces tampons est donc dépendant de la surface disponible.

La planification de l'ordonnancement consiste à pré-définir, pour un atelier donné, l'ordre d'utilisation des parcelles compte tenu des caractéristiques parcellaires, d'indicateurs d'entrée et de sortie de parcelles dans le cas des ateliers de pâturage ou des contraintes de main d'œuvre et de matériel dans le cas des ateliers de production de fourrages stockés.

Les contraintes de main d'œuvre et de matériel (essentiellement fonction de la capacité de la chaîne de récolte) sont liées au mode de récolte « foin séché au sol ». Elles sont donc identiques entre stratégies. Elles limitent le nombre d'hectares fauchés par jour. La surface maximale fauchée par jour dans les systèmes « foin séché au sol » étant de 4 hectares (section 2.3.2.1), cette limite est retenue dans le modèle décisionnel. Les indicateurs d'entrée et de sortie (section 2.3.2.1) sont chez les éleveurs suivis fonction de la quantité d'herbe sur la parcelle actuellement pâturée par les animaux (hormis chez Am qui pratique le pâturage libre et Go où les génisses consomment les refus des vaches laitières). Ainsi, dans le modèle, l'indicateur de sortie de la parcelle actuellement pâturée est l'insuffisance de la biomasse disponible pour nourrir les animaux durant un jour supplémentaire. L'indicateur d'entrée sur la prochaine parcelle à pâturer est la capacité de la biomasse disponible à alimenter les animaux durant au moins un jour.

Le choix de la prochaine parcelle à pâturer (ou à faucher dans le cas des ateliers de production de fourrages stockés) dépend de la stratégie testée : ainsi pour la stratégie 1 ou 2 et pour l'atelier foin de première coupe par exemple, les parcelles sont choisies en fonction de leur distance au siège de l'exploitation alors que pour la stratégie 3, elles sont choisies en fonction de leur altitude, leur exposition ou leur profondeur de sol.

C'est le climat qui en déclenchant des événements via des indicateurs va contribuer au pilotage du dimensionnement et de l'ordonnancement. Ce pilotage va ainsi déterminer l'utilisation des parcelles pré-affectées, l'attribution effective des parcelles tampons et l'ordre effectif de cette utilisation.

Les parcelles affectées aux différents ateliers ont des caractéristiques spécifiques. Ces caractéristiques sont celles intervenant dans la prise de décision (l'altitude, l'exposition, la distance des parcelles au siège de l'exploitation ou leur caractère fauchable ou non) ou issues de celle-ci (les types de végétation). La réserve utile ne constituait pas un déterminant cité directement par les éleveurs mais compte tenu de son influence sur la portance, elle est prise en compte. Ces caractéristiques vont donc influencer sur la production de biomasse, la précocité ainsi que la portance des parcelles et auront une incidence sur la durée et le niveau de production des ateliers.

Les stratégies que nous nous proposons de tester avec le modèle vont répondre au cadre général que nous venons de définir mais vont mettre à profit de façon différente ces spécificités des parcelles.

Conclusion

L'approche par atelier choisie pour décomposer le système de production fournit un cadre permettant de structurer l'analyse des décisions d'utilisation du territoire. Nous avons décomposé cette analyse suivant les deux volets de l'utilisation du territoire : le dimensionnement d'une part, l'ordonnancement d'autre part. Pour chacun de ces volets nous avons étudié quels ajustements sont mis en oeuvre par les éleveurs et comment est prise en compte la diversité du territoire.

Pour le dimensionnement, on constate une forte corrélation entre les pratiques mises en oeuvre et les types de végétation. Ceux-ci ne sont pourtant pas mis à profit par les éleveurs et apparaissent comme une conséquence du dimensionnement d'atelier. Les autres composantes de la diversité permettent en revanche de planifier la nature des parcelles à affecter aux différents ateliers dans les exploitations présentant plusieurs ateliers de première coupe et notamment des ateliers « foin ventilé » et « enrubannage ». Cette prise en compte influe en retour sur la durée des ateliers. Les ajustements du dimensionnement dépendent de contraintes

telles que la surface fauchable par UGB ou de la distance qui relèvent d'une diversité *sans interaction* avec le climat. Les ajustements dépendent également de la sécheresse estivale.

En ce qui concerne l'ordonnancement, on constate que son caractère fixe ou variable entre années est lié au niveau de diversité du territoire d'exploitation. Il dépend également de la capacité de l'éleveur à prévoir des régulations qui durant la campagne conduiront à son ajustement.

Plus largement on constate que la structure du territoire, sa diversité ou les contraintes climatiques peuvent contraindre ou non les possibilités d'ajustement qu'a l'éleveur. Cependant à contraintes équivalentes, deux éleveurs peuvent mettre en œuvre des ajustements plus ou moins importants. Ceci provient d'une plus ou moins grande importance des règles de pilotage au pâturage ; certains éleveurs privilégiant l'adaptation du plan chemin faisant (Girard et Hubert, 1997) d'autres une planification initiale dépourvue de régulations à mettre en œuvre en cours d'année.

La démonstration de la variabilité entre éleveurs des ajustements mis en œuvre a permis de les répartir dans trois types. Ces trois types reflètent des stratégies d'utilisation du territoire distinctes. En nous inspirant de ces types mais aussi grâce à l'identification des règles générales de conduite du système fourrager (indicateurs de prise de décision ou déterminants communs), nous avons défini un modèle général du sous-système décisionnel à articuler avec le sous-système biophysique lors de la construction du modèle du système fourrager.

Conclusion de la deuxième partie

La première étape de la démarche mise en œuvre pour tester nos hypothèses de travail est difficilement dissociable de la phase de construction du modèle. D'une part l'objectif majeur assigné à l'étude empirique était de renseigner le sous-modèle décisionnel du modèle général. D'autre part, durant cette étude, les exigences de modélisation ont à plusieurs reprises orienté nos choix de travail. Ainsi les critères de sélection des exploitations étudiées qu'il s'agisse des pré-enquêtes ou du suivi, étaient déterminés par le modèle à construire. En effet, dans l'optique du travail de modélisation nous avons souhaité étudier des systèmes pour lesquels nous supposons les stratégies d'utilisation du territoire relativement simples à étudier et modéliser. Le suivi d'un échantillon réduit de 7 éleveurs a abouti à la définition de stratégies virtuelles à comparer par modélisation. Celles-ci ont été bâties à partir d'une typologie des ajustements mis en œuvre par les éleveurs. Néanmoins, parce que nous souhaitons dissocier le dimensionnement de l'ordonnancement et disposer d'une stratégie témoin à partir de laquelle évaluer l'intérêt d'une prise en compte de la diversité du territoire, nous avons fait plusieurs entorses par rapport aux relations mises en évidence lors de cette étude empirique.

Nous n'avons donc pas exploré la variabilité des exploitations d'Auvergne et testons des stratégies virtuelles. Cependant la connaissance approfondie des conditions de terrain qu'a permis cette étude empirique aide à définir la nature des règles de décision et leur paramétrage (seuil précis déclanchant une décision donnée).

Si le modèle intervient dans notre lecture de l'étude empirique, cette dernière renseigne en retour le type de modèle à construire. En hiérarchisant les différents facteurs, elle permet de voir quelles sont les composantes du système fourrager à modéliser et guide les arbitrages à réaliser. La présentation de la phase de construction du modèle fait l'objet de la troisième partie de la thèse.

**Troisième partie : Etude à l'aide d'un modèle de la
sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques**

Introduction

Dans cette partie nous présentons les étapes 2 et 3 de la démarche d'évaluation des hypothèses (section 3 du chapitre 2).

L'étape 2 correspond à la phase d'élaboration du modèle qui doit permettre des simulations pluriannuelles des différentes stratégies définies au cours de l'étude empirique (chapitres 5 et 6). Ces stratégies ont une structure commune mais diffèrent par la mise à profit de la diversité du territoire dans les règles de dimensionnement et d'ordonnancement. Ces stratégies correspondent au sous-modèle décisionnel qu'il va falloir articuler avec un sous-modèle biophysique. La composante principale de ce sous modèle-biophysique est un modèle de croissance de l'herbe qui permet d'intégrer à la fois les effets de la diversité du territoire et des aléas climatiques sur la production des ateliers fourragers.

L'étape 3 correspond à la phase de simulation pluriannuelle des différentes stratégies à partir du modèle construit (chapitre 7). Les comparaisons s'effectuent sous l'angle de la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. L'effet de différents niveaux de diversité du territoire est également testé. L'ensemble de ces comparaisons est réalisé pour des aléas climatiques susceptibles d'induire des contraintes différentes sur les pratiques d'affectations. Ces comparaisons doivent fournir des éléments de réponse sur la possibilité ou non pour l'éleveur de réduire la sensibilité de son système fourrager en tenant compte de la diversité du territoire.

Le chapitre 5 fait le point sur l'ensemble des choix méthodologiques effectués pour la construction du modèle compte tenu de l'étude des modèles existants.

Le chapitre 6 présente le modèle construit et notamment les sous-modèles décisionnel et biophysique.

Le chapitre 7 présente la méthode employée pour les simulations ainsi que les résultats des différentes combinaisons stratégie/territoire d'exploitation/aléa climatique.

Chapitre 5 : Quel modèle construire ?

Introduction

L'objectif général de la thèse est de déterminer la relation entre l'utilisation du territoire d'exploitation, sa diversité et la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Dans cette recherche, la construction d'un modèle est motivée par deux raisons majeures :

- tester rapidement l'effet des composantes de cette relation, à travers la comparaison de plusieurs territoires d'exploitation, stratégies d'utilisation de ce territoire pour différents aléas climatiques ;
- permettre une analyse pluriannuelle qu'implique notre définition de la sensibilité aux aléas climatiques.

Le modèle doit être capable de simuler pour une exploitation d'élevage laitier caractérisée par un territoire et un troupeau, et en fonction du climat et d'une stratégie d'utilisation du territoire, la planification et le pilotage au quotidien de l'affectation de parcelles ayant des caractéristiques hétérogènes aux différents ateliers fourragers (pâturage et constitution des stocks).

Le suivi d'élevage a permis de définir la structure générale du sous-système décisionnel qui se décline sous forme de trois stratégies différentes d'utilisation du territoire. Elles se distinguent principalement par la nature des caractéristiques parcellaires prises en compte lors des décisions de planification et de pilotage qui définissent une stratégie.

La construction du modèle suppose de définir les choix méthodologiques à effectuer (complexité du modèle, pas de temps, techniques de modélisation) et également de sélectionner un modèle de croissance de l'herbe.

Pour justifier ces choix nous ferons dans un premier temps l'état de l'art des modèles appliqués aux exploitations d'élevage. Après avoir défini les notions fondamentales de la modélisation (section 1), nous insisterons ensuite sur un concept : la validation (section 2). Elle permet de caractériser le domaine de validité du modèle et apparaît comme un préalable à son utilisation dans le cadre d'une recherche. Nous étudierons ensuite les principales distinctions entre modèles (section 3) afin de déterminer la nature du modèle à construire (section 4).

1 Modélisation, définition des concepts de base

Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité (Coquillard et Hill, 1997, van Ittersum et Donatelli, 2003). Cela signifie que son élaboration nécessite de renoncer à prendre en compte certaines composantes et processus du système réel que l'on cherche à représenter (Rykiel, 1996).

L'arbitrage entre les simplifications à réaliser s'appuie sur deux contraintes : les objectifs à atteindre ainsi que l'état des connaissances concernant le système à étudier et les données à disposition (Coquillard et Hill, 1997). Des objectifs clairement définis et modestes contribuent à une meilleure efficacité des modèles (Sinclair et Seligman, 1996). Ces objectifs varient en fonction du public visé : formation, éleveurs, chercheurs, politiques (van Ittersum et Donatelli, 2003). Mais la précision des connaissances, le prix ou encore la collecte des données peuvent constituer une limitation importante (Boote *et al.*, 1996) et rendre difficile la modélisation de certains processus.

Les arbitrages réalisés déterminent le niveau d'abstraction du modèle que l'on peut définir comme son échelle d'étude (représente t'on le système agraire, le système de production ou l'animal ?). Ce niveau d'abstraction influe sur la complexité du modèle. Le niveau de détail doit être aussi simple que le permettent les objectifs. En effet, l'accroissement du niveau de précision n'améliore pas nécessairement la capacité prédictive du modèle puisqu'il correspond à une accumulation d'incertitudes (Monteith, 1996 ; Sinclair et Seligman, 1996). Plusieurs auteurs recommandent d'ailleurs de recourir (lorsque des relations suffisamment robustes existent) à des représentations simplifiées des processus plutôt que de les modéliser en détail (Sinclair et Seligman, 1996 ; Cros *et al.*, 2003).

Lors de l'élaboration d'un modèle, le choix du pas de temps est également crucial. Si on choisit de retenir un pas de temps fixe, le pas de temps à retenir est celui des événements pris en compte dans la modélisation et intervenant le plus fréquemment dans le système réel (Coquillard et Hill, 1997).

Objectifs, niveau d'abstraction, niveau de détail, et pas de temps déterminent le domaine de validité du modèle en dehors duquel il ne doit pas être utilisé (Passioura, 1996). La validité du modèle est évaluée lors de la phase de validation qui peut constituer un processus postérieur ou concomitant à la phase de développement du modèle. La validation permet de définir les capacités et limites du modèle.

Une fois ces choix méthodologiques effectués, il existe une large gamme de techniques de modélisation. Le modèle à construire peut être analytique, stochastique, il peut encore s'agir de simulation avec (modèle à compartiments) ou sans (événements discrets) composante analytique (Coquillard et Hill, 1997). Pour ces différentes techniques les formalismes divergent. Ils sont mathématiques dans le cas des modèles analytiques ou stochastiques. Les méthodes d'analyses par objet sont les plus appropriées dans le cas de modèles à événements discrets. L'analyse par objet consiste à décomposer le système en entités inspirées de l'observation du réel. Un objet est une unité de programmation qui regroupe une structure de données et les fonctions utilisant ou modifiant ces données.

Au sein des différents concepts énumérés un nécessite une attention plus précise à cause de son caractère controversé.

2 La validation des modèles

La validation doit déterminer si le modèle est, dans son cadre expérimental, une représentation acceptable du système réel cohérente avec l'utilisation souhaitée (Kleijnen et Sargent, 2000). Elle consiste généralement à comparer les sorties du modèle à partir de données indépendantes (Boote *et al.*, 1996 ; Rykiel, 1996).

Le terme de validation est toutefois très controversé (Scholten, 1999). Selon Sinclair et Seligman (1996), la validation est impossible compte tenu du fait que le modèle est une collection d'hypothèses. Deux sources d'erreurs rendent difficile la validation : l'estimation des paramètres et les simplifications réalisées (Passioura, 1996). De plus, les données avec lesquelles sont validés les modèles peuvent comporter des erreurs de mesure ou d'interprétation (Woodward et Rollo, 2002).

Idéalement, la validation consiste pour certains auteurs à tester une hypothèse nulle en établissant les circonstances dans lesquelles un modèle échoue à représenter de façon acceptable la réalité plutôt que d'admettre sa validité quand il donne des résultats satisfaisants sur un nombre limité de sites ou de saisons (Monteith, 1996).

En d'autres termes, pour ces auteurs, un modèle ne peut être qu'invalidé.

Pour d'autres, les modèles ne sont que partiellement validés. Il est en effet difficile de valider un modèle sur l'étendue de son domaine d'application. D'une part parce que la gamme de variation des variables d'entrée est large et nécessiterait un nombre de tests trop important

(Monteith, 1996). D'autre part, parce que les données expérimentales disponibles sont souvent inadaptées aux objectifs de l'étude et l'échantillonnage des variables difficile voire impossible (Cournut, 2001 ; Woodward et Rollo, 2002). Ces données expérimentales sont en effet souvent incomplètes pour ce qui est du pas de temps ou encore de l'ensemble des attributs et paramètres. Elles peuvent cependant permettre de valider des sous parties des modèles, mais cela ne certifie pas que l'assemblage de ces sous-systèmes fonctionne correctement, car certaines interactions peuvent être imprévisibles (Cros *et al.*, 2003).

Malgré ces controverses, certains auteurs admettent qu'il est possible de valider un modèle ; cette validation résidant essentiellement dans la démonstration du bon fonctionnement du modèle dans un cadre donné.

Le temps consacré à la validation dépend de l'utilisation souhaitée du modèle. La validation joue ainsi un rôle important lorsqu'il s'agit d'un modèle d'aide à la décision sur lequel des éleveurs ou des conseillers agricoles doivent baser leurs décisions. Elle n'est pas cruciale dans le cas de modèles de recherche (Boote *et al.*, 1996 ; Kleijnen et Sargent, 2000). Dans ce dernier cas, la validité du modèle réside davantage dans sa capacité à reproduire de façon suffisamment acceptable le comportement du système pour tester des hypothèses que dans la prédiction précise des sorties (Sinclair et Seligman, 1996 ; van Ittersum et Donatelli, 2003).

La validation nécessite de spécifier l'objectif de la modélisation, les critères de validation c'est à dire les critères à atteindre pour admettre son acceptabilité et le contexte, défini par les simplifications et les hypothèses qui ont contribué à sa réalisation (Rykiel, 1996).

Cette validation comporte trois volets (Rykiel, 1996) :

- la validation opérationnelle est pragmatique et consiste à déterminer si les sorties du modèle reproduisent correctement le système sans évaluer si la base scientifique est correcte ou que la structure interne est identique à celle du système ;
- la validation conceptuelle signifie que les théories et simplifications sont correctes ou justifiables, et que la structure et les relations entre les composantes du système sont raisonnables compte tenu de l'objectif du modèle ;
- la validation des données certifie de leur qualité et de leur bonne interprétation.

Pour ces trois volets de la validation les modalités d'évaluation possibles sont les suivantes (Coquillard et Hill, 1997) :

- la validation par confrontation, basée sur l'expérience des experts du système et consistant à demander à ceux-ci si le comportement du modèle leur paraît cohérent. Elle peut s'envisager dans le cadre d'une validation opérationnelle ou pour la validation des données que définit Rykiel (1996) ;
- la validation de répétitivité qui consiste à comparer le modèle avec d'autres modèles ou avec la réalité. La comparaison se fait essentiellement sur les résultats issus du modèle et non sur sa structure et son fonctionnement. Elle permet donc la validation opérationnelle définie par Rykiel (1996) ;
- la validité fonctionnelle qui vise à exploiter le modèle comme instrument de mesure et d'expérimentation afin de s'assurer de son bon fonctionnement. Elle comprend l'analyse de sensibilité consistant à faire varier certains paramètres d'entrée et à vérifier que le comportement du modèle reste toujours cohérent. Elle englobe aussi l'utilisation de tests de conditions extrêmes dans lesquels on s'assure que le comportement du système reste plausible pour des valeurs extrêmes souhaitables ou non des paramètres d'entrée. Elle traite enfin de la validité structurelle qui permet de vérifier que non seulement les résultats fournis sont satisfaisants, mais aussi que la structure interne de ce modèle correspond à la structure de fonctionnement de la réalité. A cet effet les comportements des différentes entités du modèle peuvent être tracés au cours d'une exécution pour déterminer si la logique du modèle est correcte et si la précision nécessaire est atteinte. Cette modalité se réfère à la validation conceptuelle du modèle.

Malgré son caractère controversé et même si certains auteurs soulignent son caractère moins crucial pour les modèles de recherche, la validation apparaît comme un passage obligé. En caractérisant le domaine de validité du modèle elle permet de définir la portée des conclusions tirées lorsque le modèle est utilisé pour tester des hypothèses.

3 Les différents modèles d'exploitations d'élevage

Les modèles d'exploitations d'élevage rencontrés dans la bibliographie divergent par leur utilisation, leurs techniques de modélisation ou encore le niveau de représentation des sous-systèmes biophysique et décisionnel. Nous passerons en revue ces différences.

3.1 Des utilisations différentes

3.1.1 Les modèles d'aide à la décision et les modèles de recherche

Van Ittersum et Donatelli (2003) distinguent deux grandes applications des modèles : aide à la décision ou recherche.

Les modèles d'aide à la décision ont pour objectif général d'assister les choix de l'éleveur, du conseiller agricole ou du politique. Ils visent à réduire l'incertitude dans laquelle un certain nombre de décisions sont prises en fournissant des informations sur l'environnement ou les résultats d'options de gestion alternatives. Cela suppose que les capacités prédictives du modèle soient suffisamment robustes.

McCown (2002) identifie deux utilisations possibles des modèles d'aide à la décision : « outil » ou « procuration ». Dans le premier cas il s'agit essentiellement d'étudier les conséquences d'actes techniques, l'aspect décisionnel est le plus souvent limité à des décisions de pilotage. Dans le deuxième cas il s'agit de remplacer totalement ou partiellement le processus de décision de l'expert.

Malgré les bénéfices potentiels des modèles d'aide à la décision, leur adoption par les éleveurs, qui constituent la principale cible visée, s'est avérée limitée (Cox, 1996 ; Keating and McCown, 2001 ; Meinke *et al.*, 2001). Les raisons de cette faible adoption sont multiples : méfiance des éleveurs vis-à-vis des prédictions des modèles, complexité des outils proposés, non pertinence des alternatives testées... Les cas d'adoption de ces modèles reposent généralement sur une approche participative où les décideurs font partie intégrante de leur processus d'élaboration (Meinke *et al.*, 2001 ; Thornton et Herrero, 2001).

L'une des premières utilisations potentielles des modèles de recherche citée est la synthèse des connaissances scientifiques (Bywater et Cacho, 1994 ; Boote *et al.*, 1996). Les modèles de recherche permettent également d'élaborer et d'examiner des hypothèses scientifiques. En mettant le doigt sur les insuffisances des connaissances scientifiques, ils contribuent à définir de nouveaux champs d'expérimentations. Ils peuvent également guider la recherche expérimentale en identifiant les paramètres, variables ou sous-systèmes influençant le plus le comportement du système général. Les modèles de recherche constituent une documentation de données expérimentales puisqu'ils contribuent à organiser et référencer les données utilisées pour calibrer ou tester les modèles. Ils permettent de comparer rapidement différentes alternatives de gestion sous une large gamme de conditions, ce qui serait long et coûteux via l'expérimentation (Hansen, 2002). Ils permettent d'explorer des relations qui ne pourraient l'être autrement (scénarios virtuels ou difficilement observables, études sur le long terme) et s'avèrent particulièrement utiles pour l'étude des exploitations d'élevage où l'impact de nombreuses décisions ne peut être mesuré que sur le long terme (Romera *et al.*, 2004).

Les modèles de recherche appliqués à l'étude des exploitations d'élevage s'organisent autour de deux thématiques : étudier les interactions entre les différentes composantes des systèmes de production, étudier les conséquences de stratégies ou technologies alternatives.

Dans la première catégorie, les études menées cherchent à comparer l'incidence de différentes conduites de pâturage sur la croissance ou la sénescence (Bywater et Cacho, 1994) ou sur l'ingestion et la production animale (Cacho *et al.*, 1995 ; Woodward *et al.*, 1995 ; Kristensen *et al.*, 1997 ; Moore *et al.*, 1997). Herrero *et al.* (1997) proposent un passage en revue extrêmement détaillé de la littérature relative à cette première catégorie d'étude.

Dans la deuxième catégorie, les auteurs cherchent par exemple à quantifier les conséquences de différentes stratégies de gestion des stocks fourragers hivernaux (Le Bris et Duru, 1988), d'allocation de surfaces (Coléno, 1997) ou de recours aux intrants (Charpentreau et Duru, 1983 ; Keating and McCown, 2001), face à une contrainte climatique dans la plupart des cas.

3.1.2 Optimisation et simulation

Qu'il s'agisse de modèles de recherche ou d'aide à la décision, ils peuvent être utilisés à des fins d'optimisation ou de simulation.

Dans le premier cas, l'objectif est de rechercher une politique de conduite maximisant une fonction objective d'évaluation dans un cadre de contraintes donné. La fonction à maximiser est économique dans l'essentiel des cas mais elle peut être technique : maximiser l'ingestion des animaux (Woodward *et al.*, 1995), minimiser la consanguinité (Stockes et Tozer, 2002). La combinaison d'options de gestion donnant les meilleures performances (marge brute, fonction d'utilité ou autre critère économique) est retenue par le modèle.

L'unité à optimiser peut être l'ensemble du système de production lorsqu'il s'agit par exemple d'étudier les conséquences de politiques publiques contraignantes (Amir et Fisher, 2000), d'envahissement par une mauvaise herbe (Mullen *et al.*, 2003).

Elle peut également concerner un sous-système lorsqu'il s'agit de déterminer la conduite optimale du pâturage (Woodward *et al.*, 1995) ou de la reproduction (Yates et Rehman, 1998 ; Mayer *et al.*, 2001 ; Stockes et Tozer, 2002).

Ces modèles permettent de prendre en compte des contraintes de main d'œuvre ou de surface intervenant dans la prise de décision ou de maximiser plusieurs fonctions objectives (Lee *et al.*, 1995 ; Stockes et Tozer, 2002). Cependant leur principale limite est que l'aspect organisationnel de la production au sein de l'exploitation est peu pris en compte. Le pilotage de la production n'est pas explicitement pris en compte (Coléno, 1997). Pour contourner cette limite, certains auteurs ont couplé à cette démarche d'optimisation une simulation qui en amont reproduit différentes stratégies de décision (Herrero *et al.*, 1999).

La simulation reste en effet la forme la plus appropriée pour tester différents corps de règles en les confrontant aux sources d'aléas. Les simulations s'attachent à reproduire le fonctionnement d'un système en caractérisant les changements d'état pertinents au cours du temps et en centralisant la dynamique du système sur l'occurrence des événements donnant lieu à ces changements d'état (Cournut, 2001). C'est cet aspect dynamique qui caractérise la simulation. Les changements d'états peuvent être conditionnés par des phénomènes aléatoires ou déterministes, mais essentiellement par des décisions. Dans la plupart des travaux, l'objectif est d'analyser l'influence de décisions sur certains critères de production. Les décisions simulées peuvent se rapporter à des actions et donc uniquement à des règles de pilotage (McCown *et al.*, 1996 ; Romera *et al.*, 2004), ou alors à des stratégies. Dans ce

dernier cas les règles de planification et de pilotage sont représentées, il s'agit le plus souvent de modèles d'aide à la décision stratégique (Coléno, 1997 ; Cros *et al.*, 2001).

3.2 Des techniques de modélisation différentes

Dans la section 1 nous avons cité trois techniques de modélisation : les modèles analytiques, stochastiques et les modèles dits de « de simulation » (Coquillard et Hill, 1997). Ici le terme « simulation » ne doit pas être confondu avec celui utilisé dans la section précédente pour désigner le fait d'étudier l'évolution d'un modèle au cours du temps (par opposition au choix via l'optimisation d'une sortie idéale). Au sein des modèles de simulation on distingue deux groupes : les modèles à compartiment et les modèles de systèmes complexes. Le premier groupe correspond à des modèles composés d'un ensemble structuré de sous-modèles analytiques. Le deuxième groupe est comme son nom l'indique le plus puissant pour étudier le fonctionnement des systèmes tels que l'exploitation d'élevage (modèles multi-agents, automates cellulaires, modèles décisionnels à base de règles). Il permet notamment la prise en compte de l'espace. La simulation peut être déterministe ou stochastique.

Partant d'un état initial fixé, la simulation basée sur un modèle déterministe donnera toujours le même résultat.

Il n'en est pas de même pour les modèles stochastiques dont les sorties comportent une composante aléatoire. L'analyse des résultats ne doit pas se limiter dans ce cas à la moyenne des répliques, mais intégrer la variabilité des résultats entre les différentes répliques (Coquillard et Hill, 1997).

La complexité des processus biologiques et leur sensibilité aux variations non planifiées rendent difficile la modélisation du réel (Keating and McCown, 2001). Le recours à des modèles stochastiques permet de contourner partiellement cette limite car ils peuvent rendre compte de l'incertitude provenant de la complexité des interactions au sein du système de pâturage par exemple (Pleasant *et al.*, 1997). En comparant les sorties de simulations stochastiques et déterministes d'un modèle de pâturage de brebis, Cacho *et al.* (1999) démontrent que lorsqu'on veut étudier l'intérêt de l'introduction d'une nouvelle technologie (l'irrigation par exemple) il est important de prendre en compte la variabilité de l'environnement via un modèle stochastique. Lorsque les modèles eux-mêmes ne sont pas stochastiques, utiliser des variables d'entrée aléatoires notamment grâce à des générateurs

aléatoires de climat (Mavromatis et Hansen, 2001 ; Acutis *et al.*, 2000) permet de prendre en compte la variabilité de l'environnement.

3.3 Des articulations différentes entre les composantes biophysiques et décisionnelles

Les exploitations d'élevage peuvent être modélisées en deux sous-systèmes : un système biophysique et un système de décision (Keating and McCown, 2001). Le niveau de précision dans la modélisation de ces deux sous-systèmes varie selon les approches. On observe un gradient depuis les modèles bio-économiques où le module biophysique est représenté mais les décisions limitées à des fonctions mathématiques, jusqu'aux systèmes experts où le système de décision est finement simulé au détriment parfois du système biophysique (Keating and McCown, 2001).

Certains travaux ont cherché à représenter de façon relativement équilibrée ces deux sous-systèmes. Il s'agit le plus souvent de modèles de simulation dynamiques pilotés par le climat et utilisés pour évaluer et comparer différentes stratégies de production sous l'angle des résultats, de la robustesse face aux influences externes et du comportement dynamique. L'utilité de ces modèles réside davantage dans leur efficacité à appréhender les évolutions sur le long terme de ces différentes stratégies de gestion que dans la prédiction des sorties exactes du système (Romera *et al.*, 2004).

Dans la plupart des simulateurs, les règles de décisions simulées sont des règles de pilotage exprimées sous forme de règles conditionnelles définies par l'utilisateur et s'appliquant aux différentes composantes du système biophysique. Ces règles contrôlent ainsi l'utilisation des lots d'animaux ou des blocs de parcelles (Cacho *et al.*, 1995 ; Shaffer et Brodahl, 1998 ; Romera *et al.*, 2004), ou encore la conduite des cultures fourragères ainsi que les compétitions entre ressources (McCown *et al.*, 1996).

Le simulateur SEPATOU fournit une tentative plus poussée de structuration du processus de décision (Cros *et al.*, 2001). Le module décisionnel permet de spécifier et de hiérarchiser les différentes règles de décision relatives à une stratégie. Le processus de décision est partagé en processus plus simples gérant quatre activités : l'alimentation conservée, le pâturage, la fauche ou la fertilisation. Il se fait en deux niveaux : la planification précise l'organisation

d'une activité et le pilotage décide de l'exécution d'une action en fonction des règles précédentes et d'indicateurs.

Ce dernier modèle permet donc de rendre compte d'un corps de règles tel que celui régissant la conduite des différents ateliers et donc l'utilisation du territoire d'exploitation.

L'étude des différents modèles présentés dans la section 3 éclaire sur les choix méthodologiques à effectuer pour construire notre modèle. Nous précisons ces choix dans la section qui suit.

4 L'élaboration du modèle

Les modèles passés en revue se distinguent par le type d'utilisation : aide à la décision ou recherche d'une part, optimisation ou simulation d'autre part. Ils se distinguent également par les techniques de modélisation ou encore le niveau d'articulation entre les composantes biophysique et décisionnelle. Concernant l'utilisation du modèle, nous avons posé dès le départ que le modèle à construire est un modèle de recherche puisque notre objectif premier est d'améliorer notre connaissance du système fourrager. Il apparaît également évident qu'il s'agit d'une simulation. En effet les modèles utilisés dans le cadre de simulation sont les plus appropriés pour rendre compte des décisions prises dans les exploitations d'élevage (section 4) notamment pour un corps de règle répondant au cadre général défini dans la section 2.4.4 du chapitre 4. Restent à définir le niveau d'abstraction et le pas de temps du modèle ainsi que le modèle de croissance de l'herbe. Ce modèle doit permettre de rendre compte des effets du climat, fonctionner sur un pas de temps et disposer d'un niveau de précision cohérent avec celui du modèle d'ensemble. Après avoir présenté le niveau d'abstraction, de détail et le pas de temps retenus pour le modèle (section 4.1) nous présenterons le sous-modèle de croissance de l'herbe choisi (section 4.2) puis la technique de modélisation adoptée (section 4.3).

4.1 Le niveau d'abstraction, et le pas de temps du modèle

Le niveau d'abstraction du modèle est le système fourrager qui correspond à l'exploitation d'élevage. Modéliser plus qu'un niveau hiérarchique en dessous du niveau d'abstraction conduit à trop de complexité (Sinclair et Seligman, 1996 ; Cros *et al.*, 2003). C'est la raison

pour laquelle l'échelle d'analyse la plus fine du modèle est la parcelle. Les parcelles correspondent aux entités gérées par l'éleveur au sein des ateliers fourragers (Coléno, 1997). De plus, pour rendre compte de la diversité du territoire telle que définie dans notre étude (à l'échelle d'une campagne, hiérarchie entre parcelles en ce qui concerne la production de biomasse, la précocité ou l'accessibilité), il convient de modéliser l'ensemble des parcelles de l'exploitation.

Le pas de temps choisi est journalier. Il permet une articulation plus simple entre la simulation du modèle biophysique et les décisions de pilotage (Herrero *et al.*, 1999). Les références (quantité de matière sèche ingérée par les animaux) et les données (données climatiques) mobilisées sont disponibles sur un pas de temps journalier. De plus les décisions de pilotage (déplacement et alimentation des animaux, fauche) se modélisent aisément sur une base journalière.

Le modèle simule donc sur ce pas de temps et durant toute l'année la conduite du système fourrager.

4.2 Choix du modèle de croissance de l'herbe

Le modèle de croissance de l'herbe à choisir doit (i) intégrer les effets du climat, (ii) simuler les effets de différentes dates et fréquence de défoliation ; (iii) fonctionner pour une diversité de types de végétation telle que rencontrée dans la zone d'étude.

La bibliographie présente un certain nombre de modèles de croissance de l'herbe aux niveaux de description des processus plus ou moins fins et répondant de façon diverse aux trois critères de sélection cités.

Les distinctions entre les modèles de croissance de l'herbe sont fortement dépendantes des objectifs de modélisation.

Ainsi la croissance de l'herbe dans les simulateurs Pâtur'IN (Delaby *et al.*, 2001) et Herb'ITCF (Hardy *et al.*, 2001) est très simplifiée car ces outils sont prévus pour être utilisés par les éleveurs et doivent donc utiliser des données facilement mobilisables par eux. Le modèle de croissance de l'herbe repose dans le premier cas sur des références locales obtenues à partir de mesure de hauteur d'herbe. Dans le deuxième cas, le modèle est un peu plus complexe et permet d'évaluer la production fourragère de différentes prairies (prairies temporaires et permanentes). La principale limite de ces modèles provient de la prise en

compte sommaire des effets du climat. Dans le premier cas elle se limite à une description globale (très défavorable, défavorable, normale, favorable et très favorable) en référence aux normales saisonnières de la décade. Dans le deuxième cas elle se limite à la somme des températures (au printemps) ou des évapotranspirations réelles (en été) ainsi que l'état de la réserve en eau du sol.

Le modèle proposé par Armstrong *et al.* (1997) simule la croissance, la sénescence et la biomasse sur pied de plusieurs types de couverts herbacés compte tenu de la température, la fertilisation, la teneur en azote du sol, les précipitations estivales et la réserve utile du sol. Le pas de temps simulé est décadaire et donc inadapté au processus (pilotage quotidien de la campagne) que nous souhaitons modéliser. De plus, il intègre de façon insuffisante les effets des aléas climatiques puisqu'il ne prend en compte que la température et les précipitations, et ne permet pas de simuler les effets de différentes fréquences de défoliation.

Carrere *et al.* (2002) proposent un modèle relativement complexe où la végétation est décrite par quatre compartiments : feuilles vertes, feuilles sèches, tiges vertes, tiges sèches. Les sorties attendues en termes de production animale (poids vif, veaux produits,...) justifient cette représentation des différents compartiments. Chacun d'entre eux est décrit par des variables d'état et de qualité ainsi que des fonctions allométriques représentant les relations entre variables d'état. La croissance brute dépend du rayonnement, de la température moyenne et d'un indice de nutrition azotée. Le couvert décrit est une prairie temporaire composée de plusieurs espèces, ce qui permettrait de rendre compte des types de végétation identifiés lors du suivi. En revanche les données climatiques prises en compte sont insuffisantes (pas de prise en compte des précipitations ou de l'évapotranspiration). De plus les effets de différentes dates et fréquence de défoliation ne sont pas modélisés (Baumont *et al.*, 2002).

Grazplan (Moore *et al.*, 1997) utilise un modèle de croissance de l'herbe très sophistiqué. Il peut simuler pour quatre groupes fonctionnels de plantes (pérennes, annuelles, légumineuses et graminées) le développement phénologique gouverné par la teneur en eau du sol, la longueur du jour et les températures. La croissance brute est fonction de l'interception lumineuse, la température moyenne et la teneur en eau du sol. L'allocation d'assimilats aux différents pools de tissus (vif, sénescant, mort) est également simulée. Si la prise en compte des aléas climatiques est très satisfaisante et qu'il est possible de simuler différents types de couverts, ce modèle présente cependant deux contraintes. D'une part, les effets du pâturage sur l'interception du rayonnement sont modélisés mais de façon unique quelle que soit la fréquence de défoliation. D'autre part, le nombre de paramètres à renseigner est très important

et seules des sorties attendues en termes de production animale justifient ce niveau de précision, ce qui n'est pas le cas de notre étude. En effet, compte tenu de nos choix initiaux de travail (les ateliers animaux ne sont pas considérés ou seulement à travers la demande qu'ils imposent aux ateliers fourragers), nous ne cherchons pas à disposer de sorties concernant la production animale.

Le modèle proposé par McCall et Bishop Hurley (2003) décrit la production journalière de biomasse ainsi que les flux de matière entre les tissus verts et morts de différents couverts herbacés. Cette production de biomasse est pilotée par le rayonnement mais dépend également des températures (minimale et maximales) et du bilan hydrique. L'efficacité de conversion du rayonnement intercepté varie en fonction du stade phénologique. Ce modèle est, parmi les modèles présentés dans cette partie, le seul à modéliser les repousses végétatives et ce pour différentes fréquences de défoliation. Ce modèle a été paramétré pour des expérimentations en Nouvelle Zélande, l'utiliser engendrerait des efforts importants pour le paramétrer sous nos latitudes.

Le modèle proposé par Cros et al (2003) est un modèle déterministe comprenant :

- un sous-modèle sol ;
- un sous-modèle de croissance fonction du niveau de nutrition azotée et du climat ;
- un sous-modèle de sénescence fonction de la biomasse résiduelle.

Il répond à deux des trois critères de sélection énoncés et présente un niveau de précision cohérent avec notre étude.

Les données climatiques modélisées sont la température moyenne, le rayonnement, l'évapotranspiration et la pluviométrie.

Il peut rendre compte de différentes pressions de pâturage rencontrées dans les systèmes d'élevage extensifs. Elles se caractérisent par une biomasse résiduelle et des intervalles entre utilisations spécifiques. La dissociation des sous-modèles de croissance et de sénescence permet ainsi de simuler différents régimes de défoliation, ces derniers influant davantage sur la sénescence que sur la croissance (Cros *et al.*, 2003).

Ce modèle présente en outre un avantage majeur : il est simple dans la mesure où certains processus élémentaires (respiration, photosynthèse, répartition d'assimilats) sont synthétisés par une même fonction. Cette simplicité facilite la paramétrisation du modèle.

C'est ce dernier modèle que nous avons choisi d'adopter, il nécessite néanmoins quelques adaptations :

- il ne modélise la croissance de l'herbe que du 1^{er} février au début de l'été ;

- le couvert modélisé est monospécifique et ne peut rendre compte des différents types de végétation.

4.3 Technique de modélisation : Simulation, approche orientée objet

Le modèle est déterministe compte tenu du fait que ni le modèle de croissance de l'herbe, ni les stratégies de décision ne comportent de composante stochastique.

Nous avons vu précédemment que les approches orientées objets étaient les mieux adaptées à la modélisation de systèmes complexes décrits par les modèles de simulation. Les objets définis sont inspirés du réel (Coquillard et Hill, 1997). Dans le modèle présenté par Romera *et al.* (2004), les différentes classes correspondent aux différentes entités biophysiques de l'exploitation d'élevage : animal, lot, parcelle, bloc.

De plus, les approches orientées objets, contribuent en partie au besoin de modularité des modèles exprimé par Keating and McCown (2001), cette modularité permettant au niveau informatique :

- d'ajouter de nouveaux facteurs sans de trop gros changements dans le code existant ;
- une plus grande flexibilité dans la maintenance et la mise à jour des simulateurs ;
- de prolonger la vie et l'utilité du modèle.

Les classes d'objets sont relativement indépendantes les unes des autres dans la mesure où la mise à jour d'une classe ne nécessite pas la réécriture des autres classes.

L'UML (Unified Modelling Language) facilite l'analyse des systèmes et le développement de tels modèles. Il s'agit d'un langage informatique qui permet de visualiser, spécifier, construire et documenter des modèles orientés objets (Jones *et al.*, 2001). Les objectifs majeurs de cet outil sont de fournir aux utilisateurs un support visuel, une base permettant de comprendre le langage de programmation et de faciliter les échanges entre collaborateurs (scientifiques et programmeurs par exemple). Avec l'UML, le développement d'un modèle débute par la création d'un modèle conceptuel. Ce modèle conceptuel est une représentation graphique du système montrant ses composantes, leurs liens et les informations échangées entre elles (Jones *et al.*, 2001). Une fois réalisé le modèle conceptuel, les fonctions de chaque classe d'objet peuvent être programmées dans une large gamme de langages informatiques tels que JAVA, C++, ou encore Python.

Les composantes du système à modéliser, leurs attributs et leurs fonctions nécessaires à la conduite de l'étude ont donc d'abord été décrits sous forme UML. Le langage Python a ensuite été choisi pour sa simplicité d'apprentissage dans le cadre du temps limité de la recherche.

Conclusion

L'étude des modèles appliqués aux exploitations d'élevage permet de faire le point sur un concept souvent cité lorsque l'on élabore un modèle : la validation. A la lecture de la bibliographie on constate pourtant que la validation n'est pas si cruciale compte tenu de son caractère controversé et des difficultés de sa mise en oeuvre. Elle permet cependant de spécifier les capacités et limites du modèle en fonction de son objectif. L'étude de différents modèles permet en outre de définir les principaux choix méthodologiques effectués à savoir le pas de temps du modèle, son niveau d'abstraction et la technique de modélisation. Le modèle de croissance de l'herbe choisi est facilement paramétrable, il permet d'intégrer les effets de plusieurs variables climatiques et de rendre compte de différentes fréquences de défoliation. Cependant des adaptations s'avèrent nécessaires afin de simuler différents types de végétation ainsi que la croissance et la sénescence durant l'été ou l'automne. Les choix effectués se justifient par les simplifications élaborées lors de la définition de l'objet d'étude (section 1 du chapitre 2) et par la structure du modèle décisionnel identifiée à l'issue du suivi d'élevage (section 2.4.4 du chapitre 4). Nous présentons dans le chapitre suivant le modèle ainsi construit.

Chapitre 6 : Présentation du modèle du système fourrager

Introduction

Nous avons souligné à plusieurs reprises, le caractère central du modèle dans cette recherche. Il ne constitue pas une fin en soi mais bien un outil permettant de tester différentes stratégies, aléas climatiques et territoires d'exploitation. Toutefois il constitue un résultat important de notre recherche puisqu'il fait la synthèse du travail empirique mené auprès des éleveurs et du travail bibliographique effectué pour son élaboration.

Dans ce chapitre, nous décrivons le modèle construit. Dans un premier temps nous passons en revue ses principales simplifications (section 1). Certaines correspondent à la nécessité de limiter la complexité du modèle pour faciliter à la fois le travail de modélisation et l'analyse des sorties. Elles ont été déterminées en fonction des restrictions générales de l'étude (section 1 du chapitre 2) et des observations du suivi d'élevage. D'autres simplifications révèlent des lacunes dans le champ des connaissances. Nous présentons ensuite les entrées mobilisées par le modèle (section 2) et ses deux sous-modèles (sections 3, 4 et 5). Pour ceux-ci nous détaillons les processus modélisés. Ces processus ont fait l'objet de simplifications plus fines que nous exposons également. La présentation des sorties du modèle fait l'objet de la section 6. Le modèle présenté est validé. Nous décrivons en dernier lieu la méthode de validation qui a été mise en oeuvre (section 7).

1 Simplifications générales

Plusieurs simplifications ont été réalisées compte tenu des observations du suivi et afin de faciliter l'analyse des résultats (elles évitent de multiplier les facteurs intervenant sur les résultats).

L'animal n'est modélisé que par une quantité de matière sèche ingérée chaque jour. Dans notre recherche, l'animal n'est considéré qu'à travers la demande qu'il impose aux ateliers

fourragers (section 1 du chapitre 2) puisque les ateliers de production animale ne constituent pas notre objet de recherche.

L'ingestion quotidienne (de fourrage stocké ou d'herbe) par animal est de 15 kg de matière sèche. Cette ingestion ne varie donc ni au cours du temps ni en fonction du type d'aliment ou de sa qualité.

L'ingestion est identique pour tous les animaux du troupeau. Cela revient à considérer :

- qu'il n'y a qu'un seul lot d'animaux. Les différents lots observés lors des enquêtes et du suivi ne sont donc pas modélisés. Les règles d'utilisation des parcelles sont inspirées de celles mobilisées pour le lot des vaches laitières. D'une part cette simplification a été motivée par la volonté de faciliter le travail de modélisation et plus précisément l'écriture des corps de règles de décision. D'autre part elle se justifie par l'observation lors du suivi, que les lots d'animaux à l'entretien (vaches tarées, génisses de plus d'un an) valorisent souvent des parcelles auxquelles n'ont pas accès les vaches laitières telles que les prairies éloignées, pauvres et accidentées. Dans certaines exploitations et pour le pâturage des animaux, tout se passe comme si deux îlots de parcelles ayant peu d'interaction étaient gérés par l'éleveur ;
- que les animaux composant le troupeau ont le même stade physiologique, le même poids et la même ingestion quotidienne. Prendre en compte un animal unique n'empêche pas la définition et l'évaluation de différentes conduites de pâturage (Cros *et al.*, 2001).

On ne considère pas la tolérance des animaux à la sous-alimentation (section 1 du chapitre 2). Si il n'y a pas suffisamment de stocks disponibles pour couvrir les besoins du troupeau, des achats sont réalisés.

Les parcelles sont hétérogènes en termes d'altitude, d'exposition, de type de végétation, de réserve utile, de distance au siège de l'exploitation, ou de fauchabilité. En revanche leurs surfaces sont identiques. Les caractéristiques influant sur la production, l'accessibilité ou la phénologie sont représentées. La distance ou le caractère fauchable d'une parcelle sont apparus comme des déterminants importants de l'utilisation du territoire. La surface influe également sur cette utilisation. Mais d'une part cette influence s'est révélée moindre lors du suivi, d'autre part sa prise en compte risquait de complexifier le modèle. Cette simplification signifie cependant que la surface choisie pour ces parcelles doit être cohérente avec le nombre d'UGB. Une surface parcellaire trop grande relativement au troupeau entraîne en effet des

durées de séjour du troupeau longues et une surface trop petite ne permet pas d'assurer l'alimentation de l'ensemble du troupeau.

En ce qui concerne les types de végétation, le modèle ne permet pas de les faire évoluer en fonction des pratiques mises en œuvre qui, nous l'avons vu lors du suivi, sont à l'origine de la diversité des types de végétation. Ceci résulte de l'état des connaissances : nous ne savons pas simuler l'évolution des végétations sous l'effet des pratiques. Toutefois avoir un modèle qui au cours du temps ferait évoluer les types de végétation rendrait difficile l'interprétation des résultats : il serait difficile de déterminer si une sortie donnée du modèle relève plus spécifiquement de l'effet de la stratégie de décision testée ou de cette évolution de la végétation. L'incapacité du modèle à simuler l'évolution des types de végétation n'est donc pas une limite en soit. Cependant pour ne pas aboutir à des situations trop irréalistes, les règles de décision associent les pratiques d'affectations de parcelles aux types de végétation. Ainsi des parcelles de type 5 ne peuvent être fauchées (section 5).

La main d'œuvre et le matériel n'interviennent que de manière indirecte dans la prise de décision à travers le seuil de 4 hectares limitant le nombre d'hectares fauchés par jour (section 2.4.4 du chapitre 4).

La seule source d'incertitude considérée est climatique, on ne retient donc pas celle liée aux prix et à la réglementation qui ne constituent pas notre objet d'étude.

2 Entrées

Le modèle utilise trois types d'entrées : fichier climatique (section 2.1), le type de stratégie (section 2.2), une exploitation (section 2.3).

2.1 Fichier climatique

Le climat est spécifié dans un fichier texte au début duquel est précisée l'altitude de la station météorologique puis pour chaque jour, les informations suivantes :

- température moyenne (°C) ;

- rayonnement global (en MJ/m²) ;
- précipitations (mm) ;
- évapotranspiration (mm).

2.2 Fichier décrivant une stratégie d'utilisation du territoire

Une stratégie se présente sous forme de fichier modélisant les décisions d'utilisation du territoire qui seront présentées plus en détail dans la section 5. Avant une simulation, il faut donc préciser quel fichier doit être lu.

2.3 Exploitation

Elle est saisie sous forme de fichier texte. Une exploitation est décrite par :

- le stock initial dans le bâtiment, la capacité maximale de stockage ;
- le nombre d'UGB ;
- des parcelles, chacune étant décrite par 10 attributs :
 - o affectation de la parcelle (foin de première coupe, pâturage, regain, tampon),
 - o altitude (m),
 - o distance au siège de l'exploitation (m),
 - o quantité d'herbe initiale (gm⁻²),
 - o exposition (0, 1 ou 2, correspondant à Plate, Sud ou Nord),
 - o fauchable (oui ou non),
 - o portance (oui ou non),
 - o réserve utile, RU (mm),
 - o type de végétation (1 à 5 correspondant aux cinq types caractérisés lors du suivi),
 - o nom (chaîne de caractère).

Certains de ces attributs parcellaires permettent d'initialiser la simulation (portance, quantité d'herbe, affectation de la parcelle) et vont varier durant celle-ci en fonction des règles de décision et des conditions climatiques. Les autres attributs sont fixes. Le stock initial du bâtiment permet également d'initialiser la simulation et évolue durant celle-ci . Définir une

capacité maximale de stockage permet de rendre compte de façon réaliste des capacités de stockages limitées des éleveurs.

3 Structure générale du modèle

Pour satisfaire aux besoins de modularité le simulateur est constitué de trois fichiers distincts : un fichier « décideur », un fichier décrivant le système biophysique et un fichier gérant l'interface graphique ainsi que la simulation.

Le fichier « décideur » correspond au sous-système décisionnel et contient toutes les règles de planification et de pilotage associées à une stratégie.

Le système biophysique est décrit par différents modules (parcelle, croissance de l'herbe, animal).

Ces deux fichiers permettent de simuler le système de production (figure 20).

Le dernier fichier est lui aussi composé de différents modules qui permettent de créer l'interface (qui assure l'utilisation conviviale de l'outil par l'utilisateur) et les fichiers de sortie ainsi que de lancer la simulation. Lors d'une simulation, il ordonne l'instantiation ou création (figure 21) des différentes composantes du système de production, la planification des parcelles à allouer à chaque atelier, la mise à jour des variables des différents modules et l'exécution de différentes actions (fauche, alimentation et déplacement des animaux) (figure 22).

4 Le sous-modèle biophysique

Il est décrit par trois modules : parcelle (section 4.1), croissance de l'herbe (section 4.2), animal (section 4.3).

4.1 Module parcelle

Il permet de rendre compte de la diversité du territoire de l'exploitation. Il remplit trois fonctions principales : mettre à la disposition des autres composantes du modèle les différents attributs parcellaires, calculer la portance de la parcelle, évaluer la qualité du foin récolté.

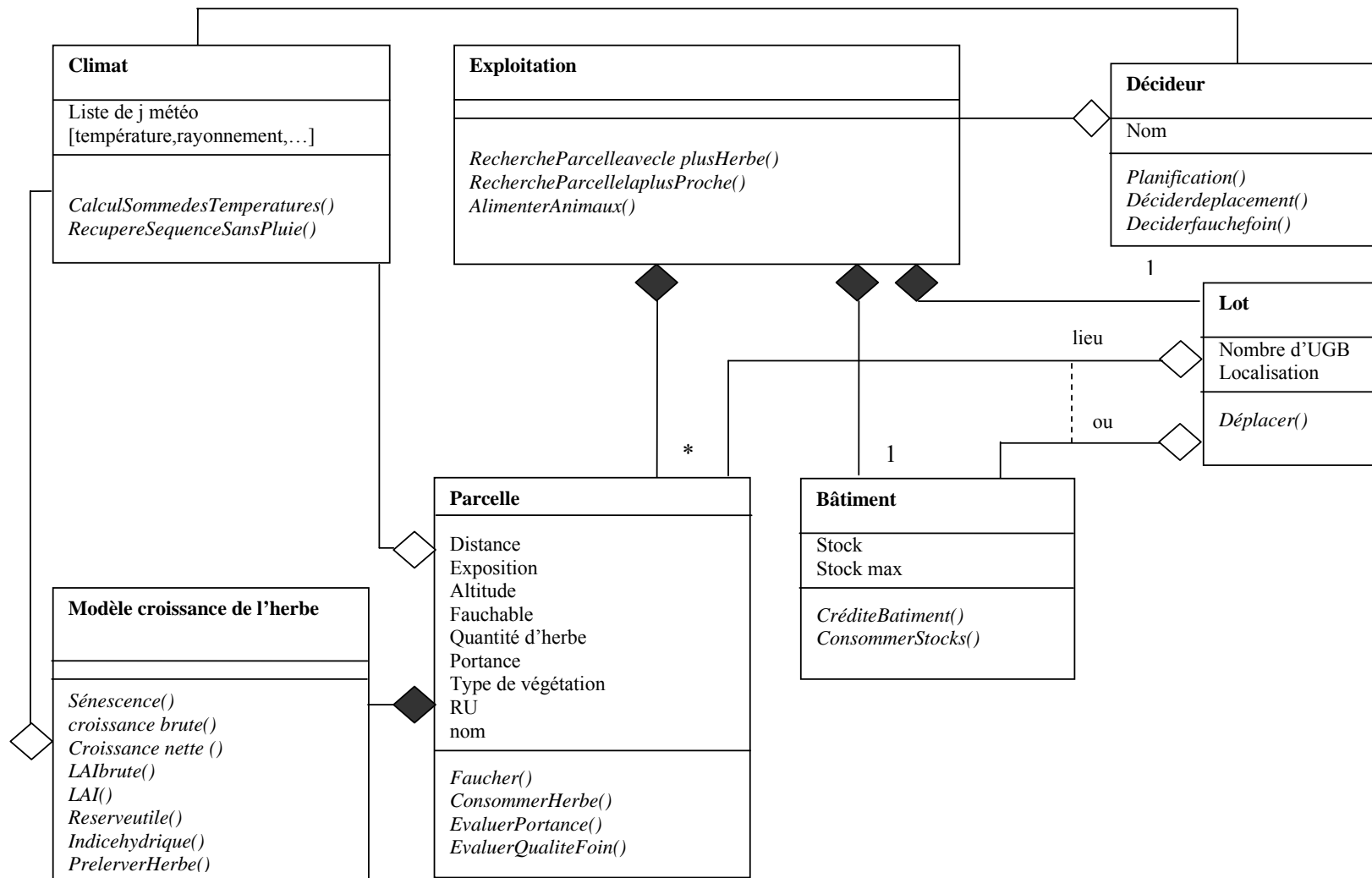
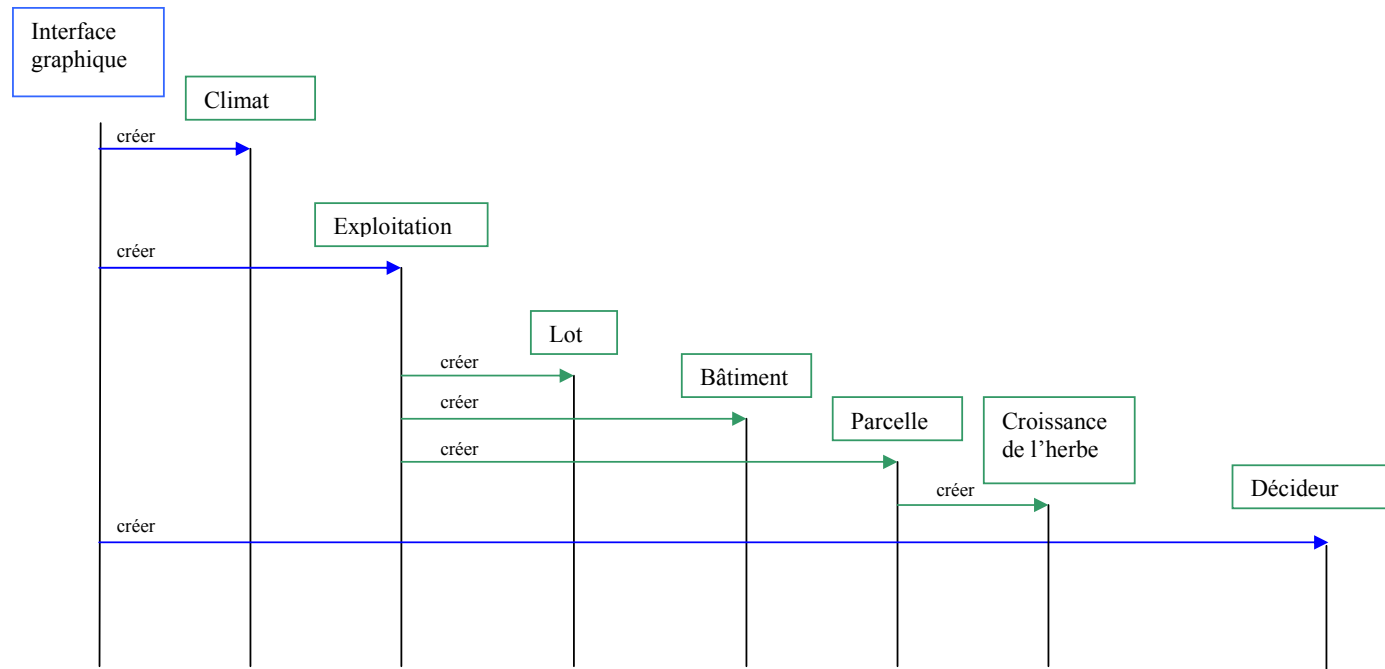


Figure 20 : Diagramme UML de la structure du modèle du système de production (en italique les principales fonctions sont mentionnées)



(1) La figure se lit à partir du haut, de gauche à droite

Les flèche bleues représentent les instructions provenant du fichier « Interface »

Les flèches vertes représentent les instructions provenant des différents sous-systèmes du fichier « Système de production »

Figure 21 : Instanciation des différentes composantes du système de production (1)

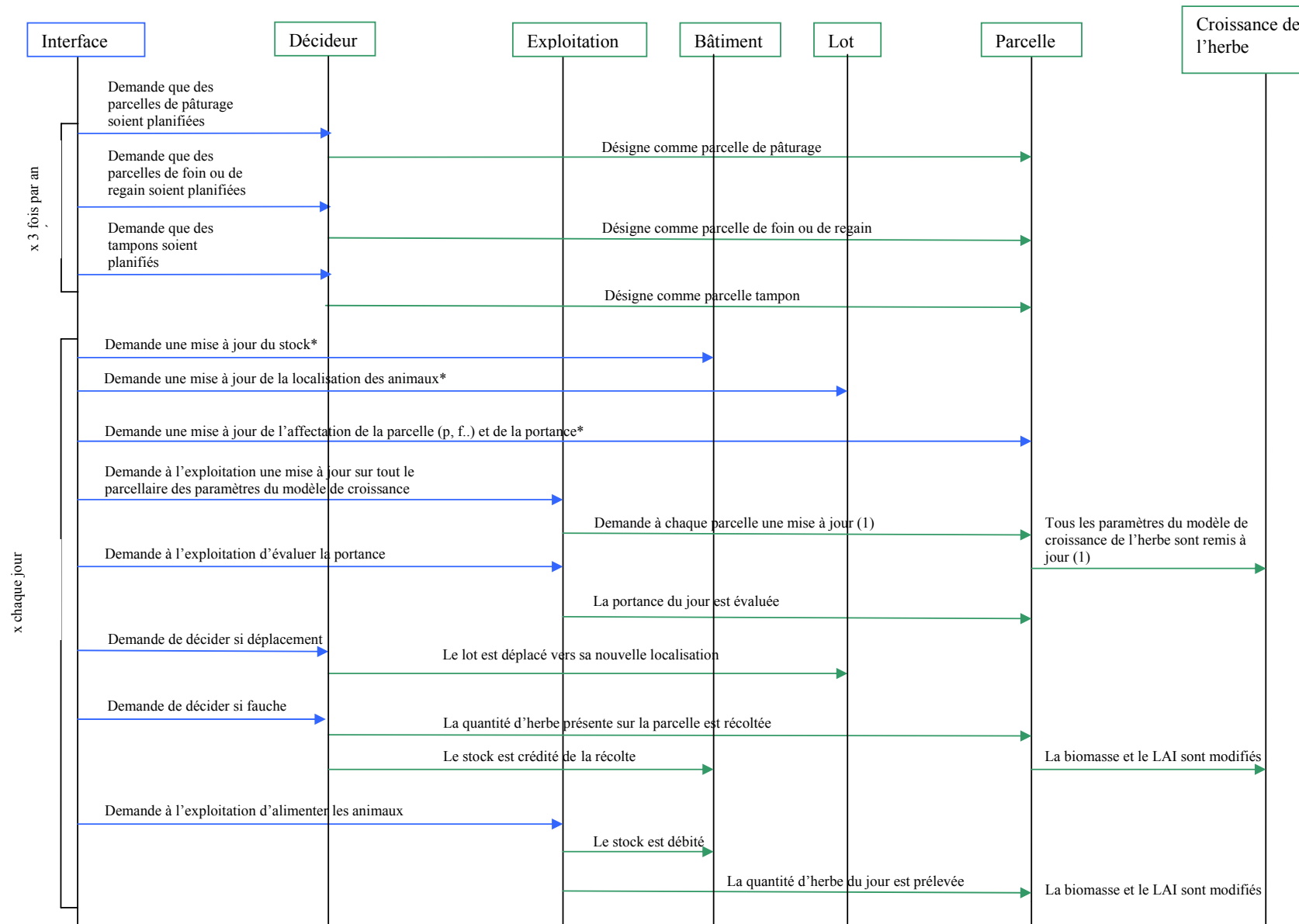


Figure 22 : Ensemble des actions déclenchées par le simulateur

(1) Les mises à jour correspondent à l'incrémentation de listes contenant les valeurs des variables calculées chaque jour de la simulation (LAI, quantité d'herbe, stock,...).

Les attributs des parcelles spécifiés en entrée sont mobilisés par des composantes différentes du simulateur. Certaines de ces caractéristiques sont en effet uniquement utilisées par le décideur (fauchable, distance au siège de l'exploitation, type de parcelle). L'altitude, l'exposition, le type de végétation, la réserve utile peuvent être pris en compte à la fois par le décideur (selon la stratégie) et le module croissance de l'herbe. Le nom de la parcelle utilisé pour désigner la parcelle lors du déplacement des animaux, est mobilisé par le décideur et le module animal.

Le module évalue la portance selon la règle suivante :

Si $P(j)+ETP(j)+RD(j)>RU$ durant trois jours consécutifs alors la parcelle n'est pas portante. P désigne les précipitations, ETP l'évapotranspiration potentielle, RD la réserve d'eau disponible (son mode de calcul est présenté dans l'annexe 6) et RU la réserve utile de la parcelle.

Le module évalue également la qualité du foin. Elle est estimée grossièrement en trois classes « bonne », « moyenne » ou « médiocre ». Elle est :

- bonne si le fourrage est fauché 200°J avant floraison ;
- moyenne s'il est fauché entre 200°J avant floraison et floraison ;
- et mauvaise s'il est fauché après floraison.

4.2 Module croissance de l'herbe

Il dépend du module précédent et permet de simuler sur chaque parcelle la production quotidienne de biomasse en fonction de sa réserve utile, du type de végétation, de l'altitude, de l'exposition, des défoliations et des données climatiques.

Le 1^{er} février correspond à la date de début de la croissance végétative (Duru, 1987). La veille, c'est à dire au 31 janvier de chaque année simulée, il y a remise à un état par défaut de chacune des variables du modèle de croissance de l'herbe. Cela permet de limiter les accumulations de biomasse entre années sur des parcelles qui auraient été sous utilisées.

Nous avons repris les trois sous-modèles proposés par Cros *et al.* (2003) à savoir :

- le sous-modèle de croissance ;
- le sous-modèle de sénescence ;
- le sous-modèle sol.

Ces trois sous-modèles ont toutefois été adaptés à notre étude pour prendre en compte la diversité du territoire d'exploitation et les repousses végétatives.

Le détail des équations utilisées est présenté en annexe 6. Dans cette section nous insistons sur les adaptations apportées au modèle de Cros *et al.* (2003) pour les besoins de notre étude.

4.2.1 Prise en compte du type de végétation et de la réserve utile

Les types de végétation caractérisés lors du suivi s'apparentent aux groupes fonctionnels identifiés par Cruz *et al.*, 2002. Ils correspondent à différents niveaux de disponibilité en azote et en phosphore et présentent des caractéristiques biologiques distinctes : durée de vie des feuilles, phénologie (Cruz *et al.* 2002). Les types de végétations sont donc modélisés par l'intermédiaire d'un indice de nutrition minérale, la durée de vie des feuilles ainsi que des sommes de températures nécessaires pour la réalisation des stades phénologiques. Il en résulte que la fertilisation est prise en compte de façon indirecte : à un type de végétation est implicitement associé un niveau de fertilisation. Les stades sont mobilisés par les sous-modèles de croissance et de sénescence. La durée de vie des feuilles est plus spécifiquement mobilisée par le sous-modèle de sénescence, l'indice de nutrition azoté par le sous-modèle de croissance. Nous précisons ces modes de prise en compte des types de végétation et de la réserve utile dans les trois sous-modèles proposés par Cros *et al.* (2003).

4.2.1.1 Modifications du sous-modèle de croissance

La modélisation de la croissance durant la phase reproductrice a fait l'objet de modifications. Le RUE est le coefficient de conversion en biomasse aérienne du rayonnement intercepté. Pour rendre compte de la variation du RUE durant cette phase bornée par la montaison et la floraison, le calcul du RUE (qui initialement dépendait d'indices azoté et hydrique et de facteurs thermique et saisonnier) prend désormais en compte un facteur phénologique. Celui-ci est décrit par une courbe parabolique dont les paramètres varient en fonction du type de végétation. En cas de première défoliation tardive (après la floraison), le RUE est égal à une constante établie en fonction de la valeur maximale atteinte par ce facteur phénologique (McCall et Bishop-Hurley, 2003 ; Duru *et al.*, travaux en cours).

4.2.1.2 Modifications du sous-modèle de sénescence

Initialement la sénescence était modélisée de façon uniforme du 1^{er} février à début juillet, et cela même après défoliation. Désormais la sénescence durant les phases végétative et reproductive est considérée. La sénescence est végétative du 1^{er} février à la deuxième durée de vie des feuilles ou si intervient une défoliation après le début-montaison. Elle s'applique à l'ensemble de la biomasse résiduelle. La sénescence est reproductive à partir de la deuxième durée de vie des feuilles. Elle ne s'applique qu'à la fraction de feuille car on considère que les tiges ne sont pas soumises à la sénescence (Calvière et Duru, 1999). La durée de vie des feuilles ainsi que les stades bornant les différentes phases varient en fonction du type de végétation.

4.2.1.3 Modifications du sous-modèle sol

L'indice hydrique est le ratio entre l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'ETP. Initialement sa formule de calcul indique qu'il est égal à 1 lorsque la réserve d'eau disponible (qui dépend du bilan hydrique et de la réserve utile) est supérieure à l'ETP. Dans le cas contraire, il est compris entre 0 et 1 en fonction du rapport ETR/ETP.

Cette formule a été légèrement modifiée et indique que lorsque la réserve d'eau disponible est supérieure à 50 % de la réserve utile de la parcelle, l'indice hydrique est égal à 1 (McCall et Bishop-Hurley, 2003).

4.2.2 Prise en compte de l'altitude

La température décroît de 0,65°C lorsque l'altitude augmente de 100 m. Cette relation linéaire entre l'altitude et la température est prise en compte dans la phénologie et le calcul de la durée de vie des feuilles.

4.2.3 Prise en compte de l'exposition

Les différences d'exposition influent sur le rayonnement reçu. Une parcelle exposée sud reçoit 1,18 fois le rayonnement d'une parcelle plate, contre 0,73 pour une parcelle exposée nord (Legros *et al.*, 1997). Ces relations sont prises en compte par un coefficient multiplicateur du rayonnement dans le calcul de la croissance brute. Nous avons renoncé à modéliser l'effet de l'exposition sur la température puisqu'il dépend de la propagation du rayonnement sur le profil vertical du couvert et de son état hydrique.

4.3 Module animal

Le module animal modélise le déplacement du troupeau ainsi que son ingestion de fourrage conservé ou d'herbe pâturée. Il est décrit par l'effectif du troupeau. La nature de l'aliment consommé par les animaux dépend de leur localisation :

- si les animaux sont dans le bâtiment alors ils mangent du foin ;
- si les animaux sont au pâturage, deux cas de figure se présentent :
 - o ils mangent de l'herbe exclusivement si la biomasse disponible est supérieure à une biomasse résiduelle de 125 g.m⁻² et permet l'alimentation du troupeau. Cette biomasse résiduelle permet une interception optimale du rayonnement et minimise des pertes par sénescence (Coléno et Duru, 1999),
 - o ils mangent la quantité d'herbe disponible sur la parcelle (au-dessus de la biomasse résiduelle) complétée par du foin.

Le foin consommé par les animaux peut provenir de l'exploitation ou d'achats en cas de disponibilités insuffisantes sur l'exploitation.

5 Le sous-modèle décisionnel

Dans la section 2.4.4 du chapitre 4, nous avons présenté la structure générale du sous-modèle décisionnel en termes de règles et d'indicateurs de décision. Ce schéma général du sous-modèle décisionnel se décline en trois variantes. Elles correspondent aux stratégies

d'utilisation du territoire de l'exploitation identifiées lors du suivi. Elles se distinguent par le niveau de prise en compte de la diversité du territoire dans les règles de dimensionnement et d'ordonnement.

Nous décrirons en détail les règles de décision de la stratégie 1, puis pour les autres stratégies nous insisterons sur leurs différences par rapport à la première.

Avant de présenter les corps de règles décrivant une stratégie, nous préciserons les principales simplifications qui ont servi de cadre à leur écriture.

5.1 Simplifications

Le système de décision reproduit de façon simplifiée les décisions d'utilisation du territoire au cours de l'année selon le cadre général présenté dans le chapitre 4.

Nous avons vu que le modèle décisionnel structure la campagne en trois séquences (section 2.4.4 du chapitre 4). Pour chacune, il y a une planification différente de l'affectation des parcelles telle qu'observée lors du suivi. Ces trois planifications rendent possible l'élargissement de la surface de pâturage en cours de campagne.

Les trois séquences s'étalent du 1^{er} février au 31 janvier selon le rythme imposé par le modèle de croissance de l'herbe. Chaque 31 janvier un nouveau cycle de planification peut débuter.

Les règles régissant la planification de l'affectation des parcelles au cours des trois séquences, sont indépendantes des années (pas de prise en compte des ruptures d'alimentation ou des reports de stocks de l'année précédente dans la définition des règles de planification). Le nombre et la nature des parcelles pré-affectées aux ateliers durant la planification des trois séquences, sont donc les mêmes chaque année. Ne pas prendre en compte les ruptures d'alimentation ou les reports de stocks dans la planification, équivaut à modéliser un éleveur qui ne mémoriserait pas les événements s'étant déroulés les années précédentes. Cette simplification bien que grossière, se justifie par le fait que dans cette étude nous ne cherchons pas à construire une stratégie de dimensionnement des surfaces comme l'avait proposé Coléno (1997), mais à tester le rôle de la diversité dans les règles d'utilisation du territoire. Prendre en compte les ruptures ou les reports de stocks ne permettrait pas de dissocier l'effet « diversité du territoire » de l'effet « coordinations inter-annuelles ».

Lors de la planification de printemps ou d'été, l'affectation de parcelles au pâturage est toujours prioritaire sur les stocks. Cela signifie que les parcelles à affecter à l'atelier pâturage sont planifiées en premier ; s'il n'y a pas assez de surface disponible pour l'affectation des parcelles aux ateliers foin de première coupe ou regain, l'objectif de production pour ces ateliers (quantité cible de stock pour couvrir les besoins hivernaux) n'est pas réalisé ce qui vraisemblablement peut se traduire par des achats systématiques de foin. Cet ordre de planification vise à privilégier l'alimentation au pâturage qui constitue un mode d'alimentation plus économique qu'une alimentation à base de fourrages conservés (Coléno, 1997).

Les parcelles tampons sont les dernières planifiées (parcelles attribuées ni au pâturage, ni aux stocks) puisque nous avons vu lors du suivi et des pré-enquêtes que leur existence était dépendante du chargement.

Seules les parcelles tampons peuvent être pâturées et/ou fauchées au cours d'une même séquence. Pour le reste, les parcelles ne peuvent pas être utilisées par un autre atelier que celui auquel elles ont été affectées (une parcelle de foin ne peut être pâturée). Ce choix s'explique par la volonté que les parcelles tampons prévues lors de la planification soient la seule source d'ajustement du dimensionnement. On aurait pu imaginer de faucher en cours de campagne des parcelles pré-affectées au pâturage à cause d'une pousse importante d'herbe mais cela aurait pu conduire à une remise en cause de la planification.

Les planifications d'été ou d'automne permettent de pouvoir pâturer des parcelles préalablement affectées au foin en changeant leur affectation.

Les animaux ne sont déplacés sur une parcelle que si elle dispose de suffisamment d'herbe pour couvrir leurs besoins durant une journée au moins. Le pas de temps du modèle étant journalier, cette règle permet de limiter les quantités de stocks distribuées au pâturage. Mais elle rend le seuil d'entrée sur les parcelles dépendant du chargement. Pâturer deux parcelles le même jour n'est pas possible compte tenu du mode de mise à jour de la production d'herbe sur une parcelle pâturée.

Pour les fourrages stockés, nous tenons compte des pertes de matière sèche intervenant au champ ou au cours du stockage. Elles sont liées aux conditions climatiques pendant le séchage ou à la teneur en matière sèche du fourrage à la fauche mais aussi aux pratiques de l'éleveur (les diverses opérations de fanage, la fumure azotée). Les pertes totales peuvent être estimées

à 10 % de la production pour un séchage au sol réalisé dans de bonnes conditions climatiques (Dulphy, 1987). Nous diminuons de 10 % la biomasse stockée.

Lorsque la quantité de matière sèche à stocker (et compte tenu des quantités déjà en grange) dépasse la capacité maximale du bâtiment, le surplus est vendu. Lorsque cette capacité maximale du bâtiment est faible, les stocks vendus sont importants au risque de ne pas engranger suffisamment de fourrages pour satisfaire les besoins hivernaux du troupeau. Lorsqu'elle est importante, le risque est d'accumuler plusieurs années de stocks produits les années favorables ce qui assure l'autosuffisance du système mais n'est pas conforme avec les capacités de stockage limitées des agriculteurs. Nous avons fixé à 3,5 tonnes par UGB cette capacité maximale de stockage. Elle couvre les besoins hivernaux du troupeau, les éventuelles distributions de foin au pâturage et peut permettre des reports de stocks limités d'une année sur l'autre.

Les précipitations (nécessaires pour le calcul des séquences sans pluie intervenant dans la décision de faucher ou non) sont considérées comme nulles lorsqu'elles sont inférieures à 0,5 mm.

5.2 Stratégie 1

« Pas de mise à profit de la diversité du territoire dans le dimensionnement ou l'ordonnancement mais ajustements »

Dans cette stratégie, seuls des ajustements du dimensionnement sont réalisés via la mobilisation de surfaces tampons. Les seules caractéristiques parcellaires prises en compte dans la planification sont leur caractère fauchable ou non, ainsi que la distance au siège de l'exploitation.

Pour ce qui est de l'ordonnancement de l'atelier pâturage, là encore la distance au siège de l'exploitation dicte l'ordre d'utilisation des parcelles. Dans le cas des ateliers foin de première coupe et regain, l'ordre des parcelles au sein du fichier d'entrée (défini de façon aléatoire) détermine leur ordonnancement.

Le Tableau 29 présente la liste des paramètres mobilisés par cette stratégie. Ils correspondent pour la plupart aux indicateurs pris en compte dans le déclenchement des règles de décision et mentionnés lors de la présentation de la structure générale du sous-modèle décisionnel (section 2.4.4 du chapitre 4). Deux sources ont permis de définir les valeurs de ces paramètres : les enquêtes de terrain et le référentiel fourrager (Réseaux d'élevage, 2001b).

5.2.1 Règles de planification

La planification pré-affecte des parcelles aux différents ateliers fourragers en précisant :

- la surface par UGB à affecter à l'atelier en fonction des besoins des animaux ;
- et la nature des parcelles à prendre en considération pour atteindre cet objectif (section 2.4.4 du chapitre 4).

La planification détermine également les surfaces tampons pouvant être indifféremment utilisées pour le pâturage ou la production de fourrages stockés.

Nous présentons pour les différents ateliers les règles permettant ces affectations.

5.2.1.1 Printemps

A. Affectation des parcelles à l'atelier « pâturage »

La surface à pré-affecter à la séquence de pâturage de printemps est « Spât1 » (tableau 29). Toutes les parcelles non fauchables sont pré-affectées au pâturage. Si la somme des surfaces des parcelles pré-affectées est inférieure à « Spât1 », alors les parcelles fauchables situées en dessous d'un seuil de distance « Dist1 » sont également attribuées à l'atelier. Ces parcelles sont prioritairement de type 4 et 5.

Tableau 29 : Liste des paramètres mobilisés par la stratégie 1

Noms des paramètres	Définition	Décision concernée	Valeur	Unité
Dist1	Distance maximale des parcelles de pâturage de printemps	Planification des parcelles de pâturage de printemps	600	m
Dist2	Distance maximale des parcelles de pâturage d'été	Planification des parcelles de pâturage d'été	1000	m
Spât1	Surface à planifier pour le pâturage de printemps	Planification des parcelles de pâturage de printemps	30	Ares/UGB
Spât2	Surface à planifier pour le pâturage d'été	Planification des parcelles de pâturage d'été	70	Ares/UGB
JA1	Jours d'avance au pâturage pour décider de la fauche des tampons au printemps	Fauche des tampons de printemps	5	Jours
JA2	Jours d'avance au pâturage pour décider de la fauche des tampons l'été	Fauche des tampons d'été	10	Jours
JA3	Jours d'avance au pâturage pour décider de la mise à l'herbe	Mise à l'herbe	15	Jours
Rdt1	Rendement moyen des parcelles de première coupe	Planification des parcelles de foin de 1 ^{ère} coupe	4,5	t/ha
Rdt2	Rendement moyen des parcelles de regain	Planification des parcelles de regain	2,3	t/ha
Ratio1	Part estimé des fourrages de 1 ^{ère} coupe dans l'alimentation hivernale	Planification des parcelles de foin de 1 ^{ère} coupe	0,93	%
Ratio2	Part estimé du regain dans l'alimentation hivernale	Planification des parcelles de regain	0,07	%
DuréeHiver	Durée prévue de l'hiver	Planification des parcelles de foin ou regain	180	Jours
Jsanspluie1	Séquence sans pluie nécessaire pour la fauche du foin de 1 ^{ère} coupe	Fauche du foin de 1 ^{ère} coupe	5	Jours
Jsanspluie2	Séquence sans pluie nécessaire pour la fauche du regain	Fauche du regain	3	Jours
HerbSeuil1	Biomasse sur pied minimum pour la fauche du foin de 1 ^{ère} coupe	Fauche du foin de 1 ^{ère} coupe	300	gm-2
HerbSeuil2	Biomasse sur pied minimum pour la fauche du regain	Fauche du regain	300	gm-2
Stade1	Stade à partir duquel la biomasse peut être fauchée	Fauche du foin de 1 ^{ère} coupe	floraison-300	°Jours
Inddeprimage	Nombre de parcelles pouvant être déprimées	Déprimage des parcelles de foin de 1 ^{ère} coupe	30	%

S'il n'y a pas assez de surface disponible pour atteindre « Spât1 », un message d'erreur apparaît.

B. Affectation des parcelles à l'atelier « foin de première coupe »

La surface (Sf) à pré-affecter au foin dépend de sa part estimée dans l'alimentation hivernale du troupeau et du rendement moyen estimé de ces parcelles, soit le calcul suivant :

$$Sf = \text{« Ratio1 »} * \text{consommation journalière d'un animal} * \text{nombre d'UGB} * \text{« DuréeHiver »} / \text{« Rdt1 »}$$

Au sein des parcelles fauchables non pré-affectées au pâturage, les parcelles éloignées et de type 1 à 3 sont prioritairement affectées au foin de façon à ce que la somme de leur surface soit supérieure ou égale à Sf.

C. Planification de parcelles tampon

Les parcelles fauchables qui n'ont pas été pré-affectées au foin ou au pâturage sont des parcelles tampons.

5.2.1.2 Eté

La planification estivale intervient quand la dernière parcelle pré-affectée au foin de première coupe a été fauchée (quelle que soit l'utilisation des surfaces tampons).

A. Affectation de parcelles à l'atelier « pâturage »

La surface à pré-affecter à la séquence de pâturage d'été est « Spât2 ». Toutes les parcelles non fauchables sont pré-affectées au pâturage. Si la somme des surfaces des parcelles pré-affectées est inférieure à « Spât2 », alors les parcelles fauchables situées en dessous d'un seuil de distance « Dist2 » sont également attribuées à l'atelier. Ces parcelles sont prioritairement de type 4 et 5.

B. Affectation des parcelles à l'atelier « regain »

La surface (Sr) à pré-affecter au regain dépend de sa part estimée dans l'alimentation hivernale du troupeau et du rendement moyen estimé de ces parcelles, soit le calcul suivant :

$$Sr = \text{« Ratio2 »} * \text{consommation journalière d'un animal} * \text{nombre d'UGB} * \text{« DuréeHiver »} / \text{« Rdt2 »}$$

Au sein des parcelles fauchables non pré-affectées au pâturage, les parcelles éloignées et de type 1 à 3 sont prioritairement affectées au regain de façon à ce que la somme de leur surface soit supérieure ou égale à Sr.

C. Planification de parcelles tampon

Les parcelles fauchables qui n'ont pas été pré-affectées au regain ou au pâturage sont des parcelles tampons.

5.2.1.3 Automne

Quand la dernière parcelle de regain a été fauchée, toutes les surfaces fauchables sont planifiées en tant que tampon, les parcelles non fauchables sont pré-affectées au pâturage.

5.2.2 Règles de pilotage

A. La mise à l'herbe

Si le nombre de jours d'avance au pâturage sur l'ensemble des parcelles affectées au pâturage (les parcelles tampon, de foin de première coupe ou de regain ne sont pas pris en compte dans le calcul) est supérieur ou égal au paramètre « JA3 », la mise à l'herbe peut avoir lieu. Si sur la parcelle de foin la plus proche du siège de l'exploitation, la quantité d'herbe disponible est supérieure ou égale au seuil d'entrée (biomasse nécessaire pour nourrir le troupeau au moins un jour), que le stade début-montaison n'est pas atteint et qu'elle est portante, alors la mise à

l'herbe est effective. Cette mise à l'herbe sur une parcelle de foin permet de rendre compte du déprimage. Celui-ci ne peut s'effectuer après le stade début-montaison.

Durant les mois de décembre et janvier la sortie des animaux est interdite.

B. Le déplacement des animaux

Juste après la mise à l'herbe, le déplacement des animaux se fait de façon prioritaire sur les parcelles de foin ayant une quantité d'herbe supérieure au seuil d'entrée et à condition que le stade de l'herbe soit inférieur au début-montaison. Le nombre de parcelles déprimées est inférieur à « inddeprimage ».

Après ce déprimage, le déplacement des animaux se fait de façon prioritaire sur les parcelles de pâturage. Si la quantité d'herbe sur la parcelle où se trouve le troupeau, n'est pas suffisante pour assurer l'alimentation des animaux un jour supplémentaire, alors les animaux sont déplacés sur la parcelle de pâturage la plus proche du siège de l'exploitation (parmi les parcelles ayant une quantité d'herbe supérieure au seuil d'entrée) et à condition qu'elle soit portante. Si aucune parcelle de pâturage ne répond à ces conditions, les animaux sont déplacés sur une parcelle tampon portante et ayant une quantité d'herbe supérieure au seuil d'entrée. Sinon, les animaux restent sur la parcelle (du foin est distribué).

C. La rentrée à l'étable

La rentrée des animaux à l'étable n'est possible qu'à partir du 1^{er} octobre. A partir de cette date, si il n'y a plus aucune parcelle portante ou que les températures moyennes sont inférieures à 0°C durant 3 jours successifs, alors les animaux sont rentrés à l'étable.

D. Fauche du foin de première coupe

Si la quantité d'herbe sur une parcelle de l'atelier foin est supérieure à une quantité d'herbe seuil « HerbSeuil1 » et s'il y a une séquence sans pluie supérieure ou égale au paramètre

« Jsanspluie1 » et si le stade de l'herbe est supérieur ou égal à un stade « Stade1 », alors la parcelle est récoltée.

Si le nombre de jours d'avance au pâturage sur les parcelles de pâturage de printemps est supérieur ou égal au paramètre « JA1 », les parcelles tampons répondant à ces conditions sont également fauchées.

La quantité récoltée est minorée de 10 %.

Lorsque l'on cumule la quantité récoltée (moins les pertes) à la quantité de stocks déjà en grange, si le cumul est inférieur à la capacité du bâtiment alors celui-ci est crédité de la quantité récoltée. Si ce cumul est supérieur à la capacité du bâtiment, alors le surplus est vendu.

E. Fauche du regain

Si survient une séquence sans pluie supérieure ou égale au paramètre « Jsanspluie2 » et si la quantité d'herbe est supérieure ou égale à une quantité d'herbe seuil « HerbSseuil2 », alors la parcelle est récoltée et le bâtiment est crédité de la quantité récoltée diminuée de 10 %.

Si le nombre de jours d'avance au pâturage sur les parcelles de pâturage d'été est supérieur ou égal au paramètre « JA2 », les parcelles tampons répondant à ces conditions sont également fauchées

La quantité récoltée est minorée de 10 %.

Lorsque l'on cumule la quantité récoltée (moins les pertes) à la quantité de stocks déjà en grange, si le cumul est inférieur à la capacité du bâtiment alors celui-ci est crédité de la quantité récoltée. Si ce cumul est supérieur à la capacité du bâtiment, alors le surplus est vendu.

La fauche est interdite durant les mois de novembre à mars.

5.3 Stratégie 2

« Mise à profit de la diversité du territoire dans le *dimensionnement* avec ajustements du dimensionnement »

Cette stratégie correspond à un éleveur prenant en compte les potentialités des parcelles uniquement dans les décisions de dimensionnement. A cette mise à profit de la diversité du territoire sont associés des ajustements du dimensionnement.

Les règles décrivant cette stratégie diffèrent de la stratégie 1 par la nature des parcelles pré-affectées aux ateliers lors de la planification. La surface pré-affectée aux différents ateliers reste néanmoins identique puisque lors du suivi nous n'avons pas constaté de lien entre cette prise en compte et une surface allouée.

De même les règles de pilotage sont identiques à celles de la première stratégie.

5.3.1 Nature des parcelles de l'atelier pâturage

Les parcelles pré-affectées au pâturage sont celles ayant la production de biomasse la plus faible de façon à privilégier les parcelles où elle est importante aux ateliers de production de fourrages stockés. Le caractère fauchable des parcelles ainsi que leur distance au siège de l'exploitation jouent néanmoins un rôle capital dans le cadre de l'atelier pâturage.

Pour gérer l'ensemble de ces caractéristiques parcellaires à prendre en compte, un système de notation a été établi. Des notes sont alors attribuées aux caractéristiques parcellaires. La valeur de la note attribuée à une caractéristique est fonction de son importance souhaitée par rapport aux autres dans les règles d'affectation. La notation a été établie de manière itérative (évaluation et hiérarchisation de la quantité de biomasse produite par des parcelles ayant des combinaisons spécifiques de caractéristiques). Pour des parcelles combinant plusieurs caractéristiques, la somme des notes de deux caractéristiques ayant une influence moindre doit rester inférieure à une caractéristique d'influence plus importante sur la production de biomasse.

Ainsi les notes les plus importantes sont attribuées au caractère non fauchable de la parcelle et sa distance, à cause de leur caractère déterminant dans les systèmes d'élevage laitiers. Vient ensuite le type de végétation qui est la caractéristique ayant l'influence la plus importante sur

la production de biomasse de même que sur la précocité. L'exposition et la réserve utile n'ont pas de rôle sur la précocité de la parcelle mais influent sur la production de biomasse. Enfin l'altitude est la caractéristique ayant l'influence la moins marquée sur la production de biomasse (en revanche elle a une influence importante sur la précocité).

Des notes sont ainsi attribuées aux parcelles en fonction des caractéristiques suivantes :

- parcelle non fauchable (les types de végétation associés aux parcelles non fauchables sont systématiquement 4 ou 5) : + **17** ;
- distance au siège de l'exploitation : + **5** ;
- type de végétation 4, 5 : + **6** ;
- type de végétation 3 : + **2,5** ;
- altitude la plus élevée : + **2** ;
- exposition 2 : + **5,5** ;
- exposition 1 : - **2,4** ;
- RU la plus faible : + **3**.

Pour chaque parcelle, et en fonction de leurs caractéristiques, le sous-modèle décisionnel additionne les notes. Les parcelles prioritairement affectées à l'atelier pâturage sont les parcelles ayant les notes les plus élevées.

5.3.2 Nature des parcelles des ateliers foin de première coupe et regain

Au sein des parcelles fauchables, des notes sont attribuées en fonction des caractéristiques suivantes :

- type de végétation 1, 2 : + **8** ;
- type de végétation 3 : + **5,5** ;
- type de végétation 4 : - **1,5** ;
- exposition 1 : + **6** ;
- exposition 2 : - **7,6** ;
- RU la plus importante : + **3**.
- altitude la plus basse : + **2**.

Les parcelles prioritairement affectées aux ateliers sont celles ayant les notes les plus élevées.

5.4 Stratégie 3

« Mise à profit de la diversité du territoire dans le *dimensionnement* et l'*ordonnement* avec ajustements »

Cette stratégie correspond à un éleveur prenant en compte les potentialités parcellaires à la fois dans les décisions de dimensionnement et d'ordonnement tout en réalisant des ajustements.

La planification est identique à celle de la stratégie précédente. Le pilotage, contrairement aux stratégies 1 et 2 prend en compte pour l'ordre d'utilisation des parcelles, la production de biomasse et la phénologie.

Dans le cas du pâturage, l'ordre dépend de la production de biomasse : parmi les parcelles ayant une quantité d'herbe supérieure à un seuil d'entrée donné, les animaux sont affectés à la parcelle ayant la biomasse sur pied la plus importante.

Dans le cas de la fauche, l'ordre dépend en premier de la précocité de la pousse de l'herbe sur les parcelles (influence du type de végétation et de l'altitude) et dans une moindre mesure de leur productivité (prise en compte de l'influence de l'exposition et de la RU pour discriminer deux parcelles ayant la même précocité). L'ordre de fauche dépend des notes attribuées en fonction des caractéristiques suivantes :

- type de végétation 1, 2 : **10** ;
- type de végétation 3 : **5** ;
- altitude la plus basse : **4** ;
- exposition 0 ou 1 : **0,5** ;
- RU la plus importante : **0,3**.

Les parcelles fauchées les premières sont celles ayant les notes les plus élevées.

6 Sorties

Il est possible de visualiser les sorties sous forme de graphiques (par exemple l'évolution des stocks en bâtiment) ou d'exporter quatre types de fichiers qui peuvent être ensuite traités à l'aide d'un tableur (Excel par exemple) :

- le fichier « général », mentionne pour chaque jour simulé :
 - o les données climatiques (Rayonnement, ETP, P, T),
 - o la quantité d'herbe produite sur chacune des parcelles ;
- le fichier « détail », utile pour déboguer ou valider le modèle de croissance de l'herbe, donne pour la parcelle choisie par l'utilisateur et pour chaque jour simulé :
 - o la biomasse sur pied,
 - o la croissance brute,
 - o la sénescence,
 - o l'indice foliaire (LAI),
 - o l'indice hydrique (Hi),
 - o la réserve disponible (RD),
 - o la portance ;
- le fichier « Activités » mentionne pour chaque jour simulé :
 - o la quantité de stock distribuée à l'ensemble du troupeau,
 - o la quantité d'herbe consommée par le troupeau,
 - o la localisation du troupeau,
 - o le cumul de la quantité récoltée ;
- le fichier « Calendrier » présente sous forme de calendrier fourrager l'utilisation journalière des parcelles, la quantité et la qualité du fourrage récolté sont indiquées en cas de fauche.

7 La Validation du modèle

7.1 La démarche adoptée

Parmi les trois approches de validation proposées par Coquillard et Hill (section 2 du chapitre 5) nous en avons retenu deux qui sont intervenues à des moments différents de la phase d'élaboration du modèle :

- la validation fonctionnelle à chaque ajout d'une composante (attribut parcellaire supplémentaire,...) ;

- la validation par confrontation dans la phase finale.

La validation de répétitivité est difficilement envisageable pour des modèles relatifs à des systèmes biologiques pilotés, c'est à dire comprenant une composante décisionnelle. En effet dans de tels modèles, des simplifications sont faites concernant le processus de décision du pilote. Ainsi, les décisions humaines sont souvent prises en compte en termes stratégique avec comme hypothèse de base que cette stratégie de conduite n'évolue pas durant le temps de simulation (Cournut, 2001). De plus, la comparaison des sorties des simulations à des données expérimentales n'est faisable que dans des modèles intégrant un nombre limité de variables et paramètres (Cros *et al.*, 2001). La validation devient donc difficile pour le modèle actuel destiné à produire des estimations de différents processus dynamiques variant sur un pas de temps journalier et sur toute la campagne.

La validation fonctionnelle a fait partie du processus de développement du modèle. L'ajout d'une composante supplémentaire dans le modèle s'est accompagné systématiquement d'un test de sensibilité ou de tests de conditions extrêmes. La validation fonctionnelle du modèle de croissance a par exemple consisté à tester toute chose égale par ailleurs, différentes valeurs pour chacun des attributs parcellaires suivants : la réserve utile, l'exposition, le type de végétation, l'altitude. Ces tests ont permis de mieux connaître les réactions du modèle et de s'assurer que ces réactions étaient conformes à celles retrouvées dans le référentiel fourrager ou observées lors du suivi. Ces tests ont également contribué au calibrage du modèle.

Dans la phase finale d'élaboration du modèle, nous avons choisi de mener une validation par confrontation car elle apparaissait la mieux adaptée dans le cas d'un modèle comportant un sous-modèle décisionnel. Pour Cros *et al.* (2001), cette approche faisant intervenir des scientifiques et des experts du pâturage est la seule possible pour des systèmes complexes. Elle consiste à proposer aux experts des simulations à partir de cas proches de leurs cas d'étude et de leur demander si le comportement du modèle est réaliste.

La validation du modèle a nécessité deux étapes :

- la validation du sous-modèle biophysique ;
- la validation du modèle d'ensemble et plus précisément de la capacité du sous-modèle décisionnel à piloter le sous-modèle biophysique.

Le sous-modèle biophysique constitué principalement du modèle de croissance de l'herbe a largement été validé dans des études antérieures (Coléno et Duru, 1999 ; Cros *et al.*, 2001).

Ici, il s'agissait donc plus particulièrement de valider les adaptations réalisées dans le cadre de notre recherche, à savoir la modélisation de la croissance et la sénescence durant la phase reproductive ainsi que la prise en compte des caractéristiques parcellaires (types de végétation, altitude, exposition). En ce qui concerne le sous-modèle d'ensemble, les éleveurs suivis avaient, à travers les diagrammes de pilotage qui leur avaient été présentés lors des différents entretiens, validé de façon itérative les règles de décision retenues pour décrire la conduite de leurs ateliers fourragers. Il s'agissait donc pour cette validation à dire d'experts de réagir sur les règles (la nature de ces règles, leurs indicateurs de déclenchement, leur paramétrage, leurs simplifications) caractérisant les trois stratégies d'utilisation du territoire et sur leur capacité à simuler des résultats de production réalistes.

Pour cette validation nous avons mobilisé un éleveur ayant fait partie du suivi ainsi que des conseillers agricoles.

Pour chacune des deux étapes de cette validation, nous avons présenté aux experts des résultats de simulation (figure 23 et tableaux 30 et 31) dont nous avons choisi les entrées à savoir la stratégie, le territoire d'exploitation et les données climatiques.

En ce qui concerne la validation du modèle biophysique, la stratégie de décision simulée était très simple puisqu'elle comprenait une seule règle de décision, consistant à faucher l'ensemble des parcelles à trois dates prédéfinies (fin juin, mi-août et mi-septembre).

L'exploitation simulée n'avait pas d'animaux mais un territoire d'exploitation comprenant sept parcelles : une parcelle de référence plate, située à la même altitude que la station climatique, ayant une profondeur de sol moyenne (50 mm) et une végétation de type 2. La deuxième parcelle variait simplement par son altitude (200 m de moins que la parcelle de référence), la suivante par sa réserve utile (30 mm), les deux suivantes par leur exposition (sud et nord), les deux dernières par leur type de végétation (3 et 4).

Les données climatiques des stations de Landos et Marcenat ont été considérées. Ces stations sont situées dans les zones connues par les experts (les caractéristiques de ces données sont présentées dans la section 1.1.2 du chapitre suivant).

Pour la validation du modèle d'ensemble, les stratégies 1 et 3 ont été simulées (il s'agissait d'une version de ces règles un peu différente que celle exposée précédemment puisque c'est leur version finale qui est présentée dans la section 5) avec les données climatiques de Landos. L'exploitation comprenait 17 UGB et 17 parcelles ayant des attributs différents.

Les sorties étudiées pour la validation à dire d'experts du modèle biophysique correspondaient à l'évolution au cours de l'année de la production de biomasse des sept parcelles.

Les sorties utilisées pour la validation à dire d'experts du modèle d'ensemble correspondaient davantage aux informations que les experts ont l'habitude de manipuler :

- calendrier fourrager ;
- dates d'occurrence des événements-clefs (mise à l'herbe, fauche du foin de première coupe ou du regain,...) ;
- quantités de stocks récoltées, vendues ou achetées par UGB ;
- surfaces exprimées en ares par UGB.

Pour cette validation, il a été demandé aux experts de réagir sur les sorties moyennes, mais aussi dans la mesure du possible sur leur variabilité (réalisme des écarts entre années ?), compte tenu de leur connaissance du terrain mais aussi d'autres modèles avec lesquels ils ont l'habitude de travailler (Réseaux d'élevage, 2001b ; Gay *et al.*, 2001). L'ensemble des commentaires des experts a été enregistré. Pour des validations de répétitivité des seuils sont souvent définis au delà desquels l'hypothèse de validité du modèle est rejetée (Rykiel, 1996). Pour cette validation aucun seuil n'a été défini car il s'agissait davantage d'un échange avec les experts sur les points faibles et atouts du modèle pouvant donner lieu à des corrections éventuelles. En d'autres termes, même si cette validation est intervenue dans la phase finale de développement du modèle, elle a fait partie de son processus de conception.

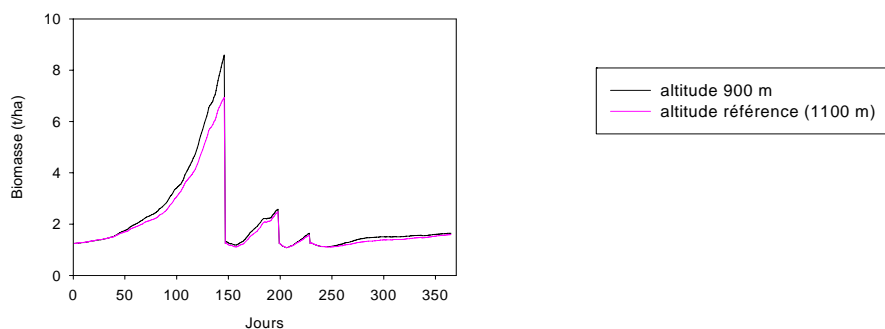
Tableau 30 : Exemples de données présentées aux experts pour la validation du modèle d'ensemble : « les dates »

	Mise à l'herbe	Rentrée à l'étable	Date de première coupe	Dernière coupe de foin	1ère coupe de regain	Élargissement de la surface de pâturage
1993	26	avr	26	avr	26	avr
1994	14	oct	14	oct	14	oct
1995	15	juin	15	juin	15	juin
1996	25	juil	25	juil	25	juil
1997	26	juil	26	juil	26	juil
1998	04	août	04	août	04	août
1999	29	avr	29	avr	29	avr
2000	06	nov	06	nov	06	nov
2001	12	juin	12	juin	12	juin
2002	19	juil	19	juil	19	juil
2003	18	août	18	août	18	août
Moyenne	11	août	11	août	11	août

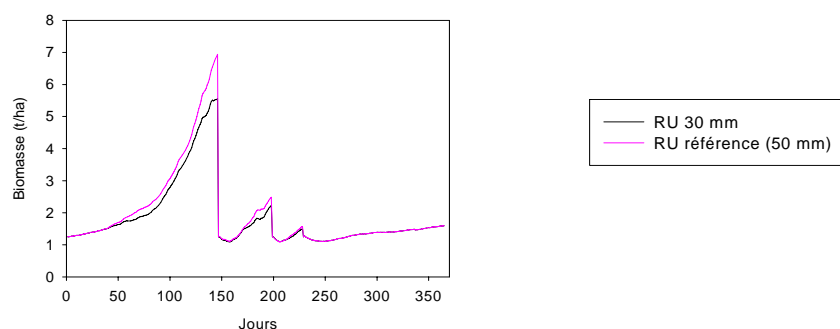
Tableau 31 : Exemples de données présentées aux experts pour la validation du modèle d'ensemble : « les stocks fourragers »

	Récolte (t/UGB)	Ventes (t/UGB)	Achats (t/UGB)	Distributions au pâturage (t/UGB)	Rendement moyen de foin (t/ha)
1993	3,56	0,55	0,00	0,28	5,35
1994	3,00	0,00	0,00	0,22	4,30
1995	2,48	0,00	0,00	0,81	4,06
1996	2,96	0,00	0,53	0,00	4,48
1997	2,84	0,00	0,18	0,25	4,08
1998	3,56	0,00	0,06	0,36	4,12
1999	2,34	0,00	0,00	0,11	3,71
2000	2,99	0,00	0,00	0,37	4,19
2001	3,45	0,36	0,00	0,03	4,66
2002	2,36	0,00	0,00	0,26	4,10
2003	2,00	0,00	0,00	0,50	3,05
Moyenne	2,87	0,08	0,07	0,29	4,19

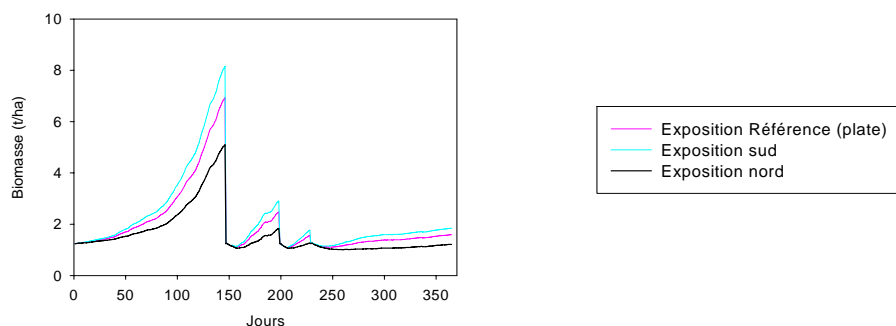
a) Comparaison de la production de biomasse en fonction de l'altitude



b) Comparaison de la production de biomasse en fonction de la réserve utile (RU)



c) Comparaison de la production de biomasse en fonction de l'exposition



d) Comparaison de la production de biomasse en fonction du type de végétation

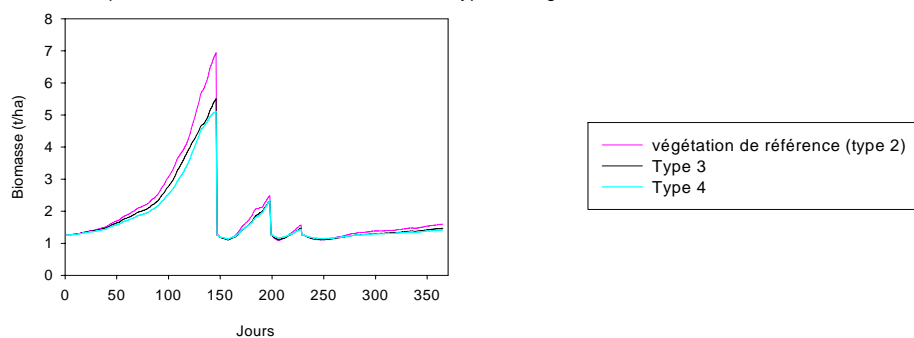


Figure 23 : Exemples de données présentées aux experts pour la validation du modèle biophysique

7.2 Commentaires et suggestions des experts

7.2.1 Commentaires sur le modèle biophysique

Les experts ont émis deux réserves concernant les résultats présentés :

- ils auraient souhaité qu'aux différents types de végétation soient associés des apports de fertilisants afin de se faire une représentation immédiate des pratiques. Dans le modèle, la fertilisation est modélisée de façon indirecte à travers les types de prairies qui dépendent de la disponibilité en azote et en phosphore ;
- ils auraient souhaité au lieu de dates de fauche identiques entre parcelles, des dates variables adaptées aux types de végétation et donc aux pratiques de défoliation observées sur le terrain : par exemple il est rare qu'une prairie productive soit fauchée fin juin, elle l'est plutôt fin mai à l'altitude considérée.

Pour une prairie de type 3, fauchée fin juin comme c'est le cas sur le terrain, les experts ont trouvé la phénologie et les quantités produites extrêmement réalistes que ce soit pour la première coupe ou pour les suivantes.

L'effet de la profondeur de sol et celui de l'altitude semblaient également réalistes. En ce qui concerne l'exposition, les experts n'ont pas pu s'exprimer. En effet, ils en connaissaient davantage le rôle sur la phénologie que sur la production de biomasse. Or, dans le modèle, c'est le choix inverse qui a été réalisé puisqu'il simule l'effet de l'exposition sur la quantité de rayonnement reçu et non pas sur la somme de températures (section 4.2.3).

7.2.2 Commentaires sur le modèle du système fourrager et les règles de décision

D'une manière générale, il apparaît que les conseillers agricoles réagissent plus aisément sur les informations moyennes et n'ont pas d'avis sur la variabilité inter-annuelle des données présentées. L'éleveur présent, même s'il n'est pas capable de quantifier cette variabilité reconnaît cependant qu'elle existe. Par exemple, sur son exploitation, la mise à l'herbe a eu lieu au plus tôt fin mars et au plus tard début mai.

Les dates de mises à l'herbe moyenne, de début et de fin de l'atelier foin de première coupe, ou encore de récolte du regain correspondent aux références dont les experts disposent sur la

zone pédo-climatique à laquelle appartient la station climatique modélisée. Cependant la date d'élargissement de la surface de pâturage est jugée trop tardive par les experts : dans cette zone la production d'herbe est limitante l'été et l'élargissement devrait être plus précoce. Les experts proposent une piste : diminuer les quantités fauchées en regain.

Les quantités de stocks récoltées, achetées ou distribuées au pâturage ainsi que le rendement moyen des parcelles de foin sont jugés satisfaisants et conformes à leur références.

Le calendrier fourrager a déclenché beaucoup de réactions puisqu'il s'agit d'un support de travail familial pour les experts. Il apparaît réaliste et traduit des pratiques rencontrées chez certains éleveurs. Néanmoins, il met en évidence l'absence d'une période de déprimage généralement constatée dans de tels systèmes et une gestion du pâturage mauvaise pour certaines parcelles. Concernant la période de déprimage, le suivi a montré qu'elle permet d'avancer légèrement la date de mise à l'herbe, et d'assurer un stock de qualité. Concernant la mauvaise gestion du pâturage, on constate en effet que sur dix-sept parcelles, deux ont des intervalles entre pâturage supérieurs à 40 jours. Ces pratiques sont le résultat des règles puisqu'il s'agit de parcelles éloignées. Or la stratégie simulée privilégie les parcelles proches. Elles se rencontrent dans la réalité mais sont atténuées par la présence de lots d'animaux à l'entretien comme par exemple celui des génisses. Les experts ont ainsi suggéré qu'une règle permette d'éviter de telles pratiques en fauchant une parcelle pour laquelle la qualité de l'herbe serait défavorable. Ils suggèrent par conséquent que le modèle soit capable d'estimer la qualité de l'herbe. Cette suggestion est mise en débat avec la possibilité que ce type de pratique reste une sortie du modèle qui permette une évaluation éventuelle de la sensibilité d'une stratégie de décision.

Concernant plus précisément les règles de décision simulées, elles n'ont pas fait l'objet de réaction particulière hormis pour certains paramètres :

La séquence de 4 jours sans pluie nécessaire pour déclencher la fauche du foin de première coupe est confirmée par l'éleveur présent mais jugée trop faible par les conseillers qui suggèrent une séquence de 5 à 6 jours.

La séquence sans pluie nécessaire à la récolte de regain est également jugée trop courte. Une séquence de 3 jours au lieu de 2 paraît plus réaliste aux conseillers agricoles.

7.2.3 Corrections apportées au modèle, à la suite de la phase de validation

Pour la validation du modèle biophysique, nous nous sommes basés sur sept parcelles pour lesquelles nous comparions l'effet du changement de la valeur d'un attribut (toutes choses égales par ailleurs). Cette démarche courante pour les expérimentations n'a pas satisfait les experts qui auraient préféré par exemple des dates de fauche adaptées aux types de prairies. Pour la validation du modèle d'ensemble, un autre jeu de données climatiques aurait été souhaitable afin de le valider dans une autre zone climatique et ainsi comparer les deux zones entre elles. Cette réunion de validation n'a pas conduit à une remise en cause de fond du modèle du système fourrager et de son sous-modèle de croissance de l'herbe. Concernant les suggestions de modification de valeurs des paramètres, passer d'une séquence de 4 à 5 jours sans pluie n'est pas sans conséquence sur les sorties d'une simulation. Cela peut conduire à retarder considérablement les dates de fauche et la suite de la campagne. La question du crédit à accorder à ces suggestions par rapport au suivi est importante. Le suivi ayant été réalisé sur une année et l'expertise faisant appel à une expérience de plus long terme et portant sur un nombre plus important de cas, nous avons choisi de prendre en compte les suggestions des experts concernant la modification de la valeur des paramètres et de rajouter une période de déprimage. Les règles présentées dans la section 5 ont donc pris en compte ces modifications. En revanche nous avons conclu que l'intervalle entre utilisations devait rester une sortie du modèle.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la structure du modèle puis celle de ses deux composantes : le sous-modèle biophysique et le sous-modèle décisionnel. Le modèle présenté est un modèle validé. Au sein des différentes méthodes de validation, la validation à dire d'experts nous a paru la plus pertinente. Cette phase de validation a mis en évidence les précautions à prendre dans le mode de présentation des résultats lorsque sont mobilisés des experts. Elle n'a pas conduit à une remise en cause de fond du modèle et a permis d'affiner son paramétrage. Elle garantit dans une certaine mesure le réalisme des sorties compte tenu des nombreuses simplifications opérées. La phase d'utilisation du modèle peut alors être amorcée.

Chapitre 7 : Comparaison par simulation des stratégies de décision pour différents territoires d'exploitation et séries climatiques

Introduction

A l'aide du modèle construit, nous comparons les trois stratégies d'utilisation du territoire pour deux niveaux différents de diversité du territoire et deux séries climatiques. Les deux séries climatiques sont susceptibles d'engendrer des contraintes différentes sur la production fourragère. Nous nommons « scénario » la combinaison stratégie/territoire/série climatique. Le critère de comparaison de ces différents scénarios est la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Cette sensibilité est évaluée à partir d'indicateurs pertinents choisis au sein des sorties du modèle pour leur capacité à rendre compte de la variabilité inter-annuelle des résultats de production. Dans ce chapitre nous présentons le plan d'expérience de ces comparaisons (section 1), c'est-à-dire les différents scénarios testés et les indicateurs d'évaluation, puis les résultats obtenus (section 2).

1 Matériel et méthode

1.1 Les différentes simulations

Nous rappelons brièvement les trois stratégies d'utilisation du territoire. Nous présentons ensuite les séries climatiques et les territoires d'exploitation utilisés pour ces simulations (figure 24).

1.1.1 Simuler les différentes stratégies d'utilisation du territoire

La comparaison des stratégies d'utilisation du territoire doit permettre d'évaluer :

- si la prise en compte de la diversité du territoire dans les règles de dimensionnement (stratégie 2) permet de limiter la sensibilité aux aléas climatiques par rapport à la stratégie 1 où cette diversité n'est pas prise en compte ;
- si la prise en compte de la diversité du territoire dans les règles d'ordonnancement (stratégie 3) permet de limiter la sensibilité aux aléas climatiques par rapport aux stratégies (1 et 2) où cette diversité n'est pas prise en compte dans l'ordonnancement.

1.1.2 Deux types de séries climatiques

Nous avons sélectionné deux stations climatiques appartenant aux deux grandes zones d'étude du suivi d'élevage et pour lesquelles les contraintes climatiques engendrées sur la conduite du système fourrager sont différentes (figure 25) :

- station de Landos, Haute Loire, 1148 m d'altitude : la pluviométrie est faible et entraîne un déficit fourrager estival tant en ce qui concerne la récolte des regains que le pâturage ;
- station de Marcenat, Cantal, 1060 m d'altitude : la pluviométrie importante est une contrainte pour la fauche.

Ces deux stations ont précisément été choisies car elles font partie des rares stations des zones étudiées pour lesquelles Météo France dispose pour plusieurs années de l'ensemble des données journalières requises par le modèle. De plus, elles se situent approximativement à la même altitude.

Pour ces deux stations nous avons recueilli auprès de Météo France les données climatiques journalières de 1993 (date du début de calcul de l'ETP en Auvergne) à 2003. Les figures 26 et 27 décrivent ces années selon trois critères :

- 2 critères (déficit climatique et somme des températures depuis le 1^{er} février) décrivant le caractère favorable ou non de ces années sur la pousse de l'herbe au printemps ;
- 1 critère (déficit climatique) décrivant le caractère favorable ou non de ces années sur la pousse de l'herbe durant l'été.

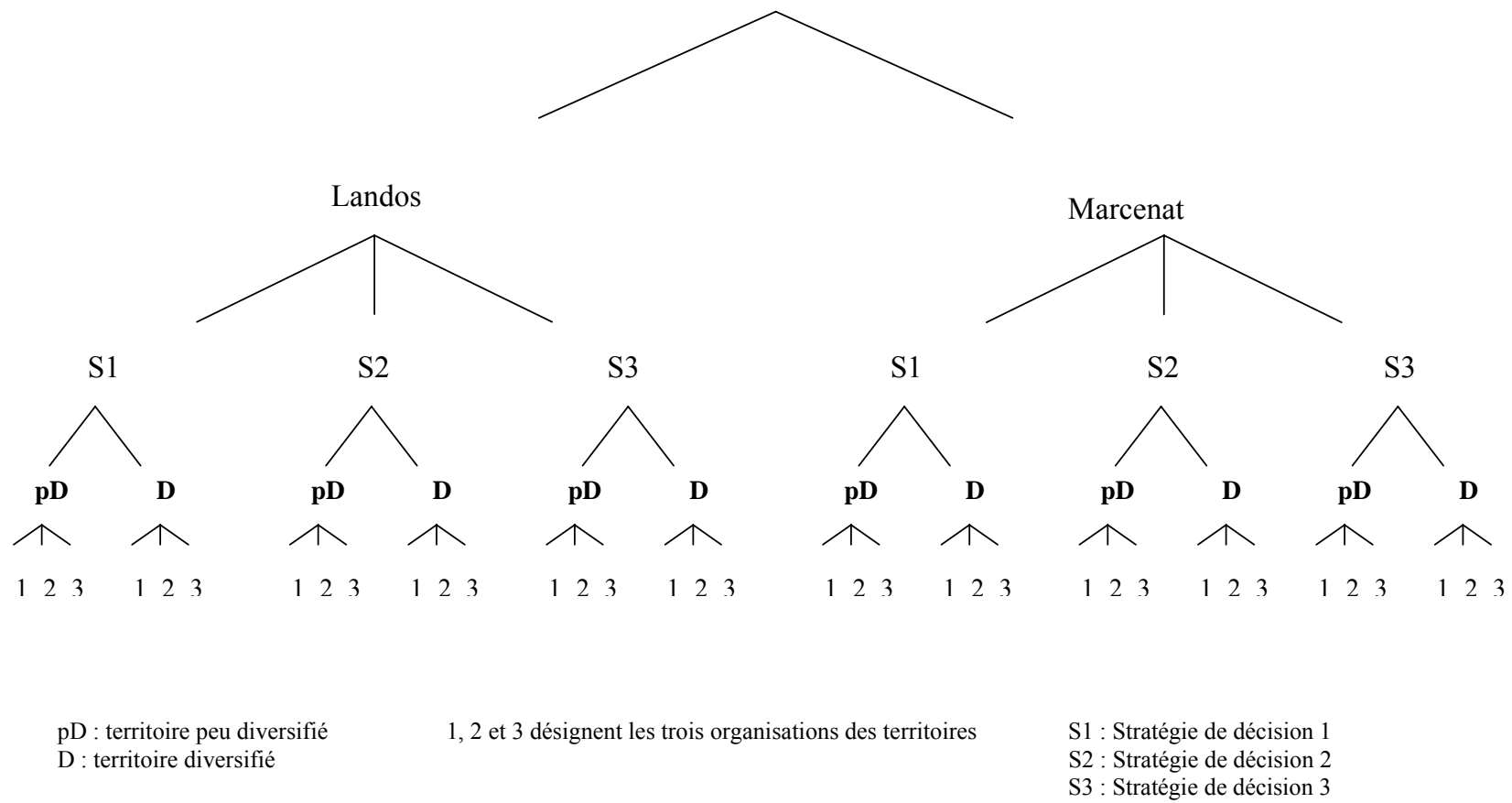
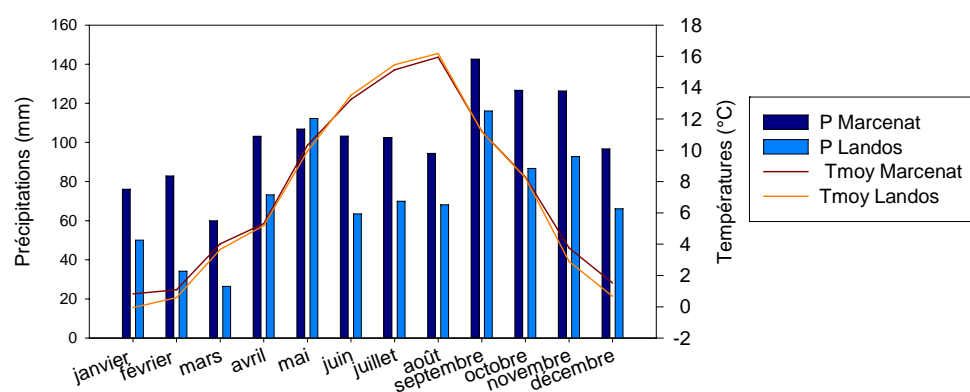
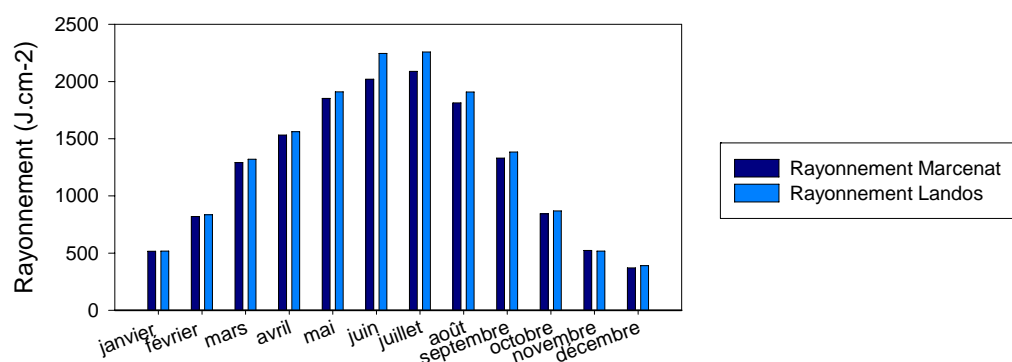


Figure 24 : Les simulations

a) Diagrammes Précipitations-Températures des stations de Landos et Marcenat (93-2003)



b) Moyennes mensuelles du rayonnement des stations de Landos et Marcenat (93-2003)



c) ETP mensuelles des stations de Landos et Marcenat (93-2003)

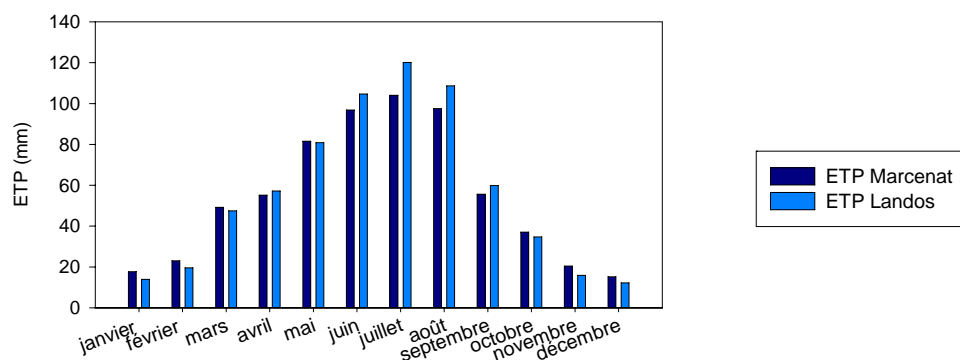


Figure 25 : Comparaison des normales mensuelles des stations de Landos et Marcenat

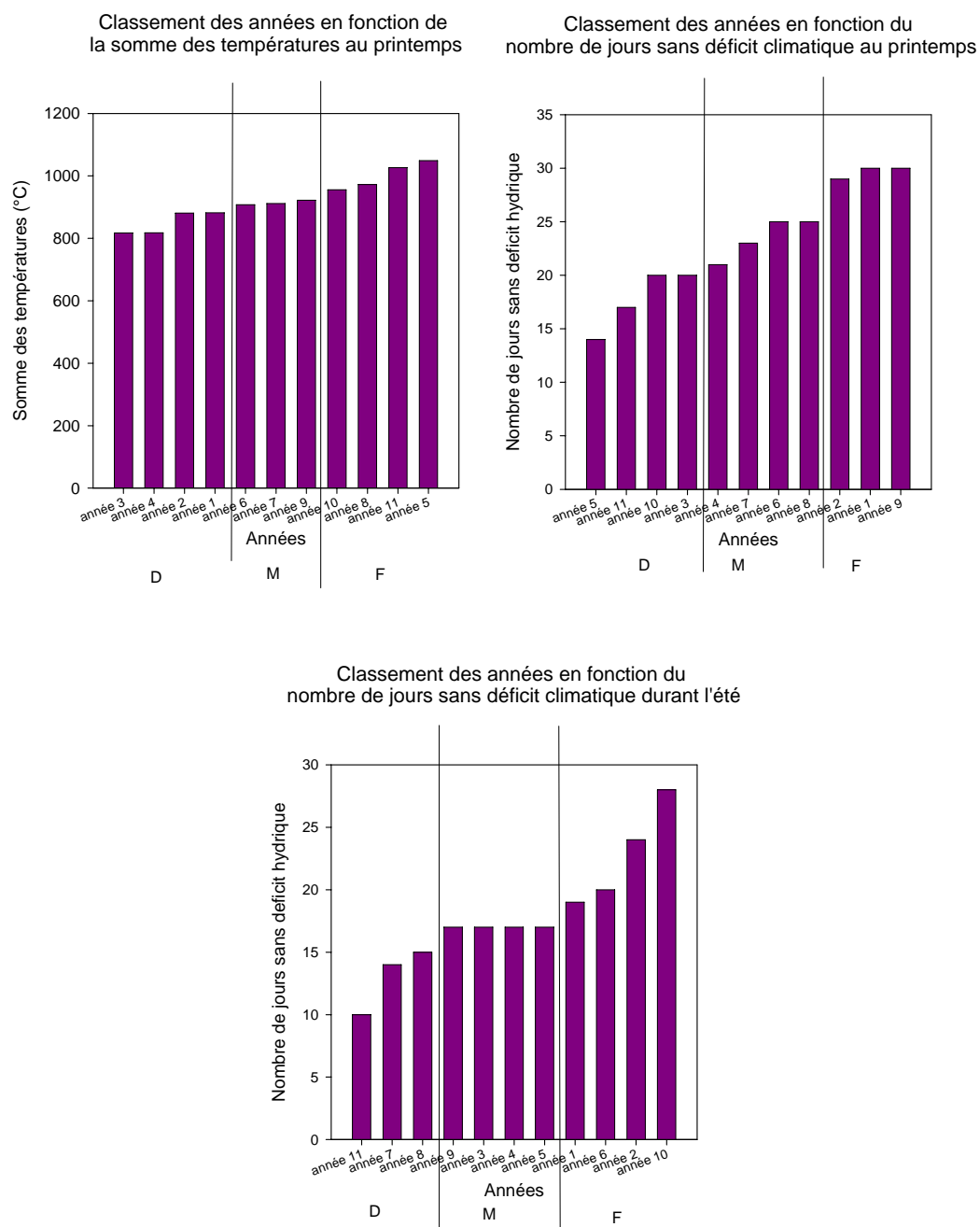


Figure 26 : Classement des années climatiques de la station de Landos (D : année défavorable, M : année moyenne, F : année favorable à la pousse de l'herbe)

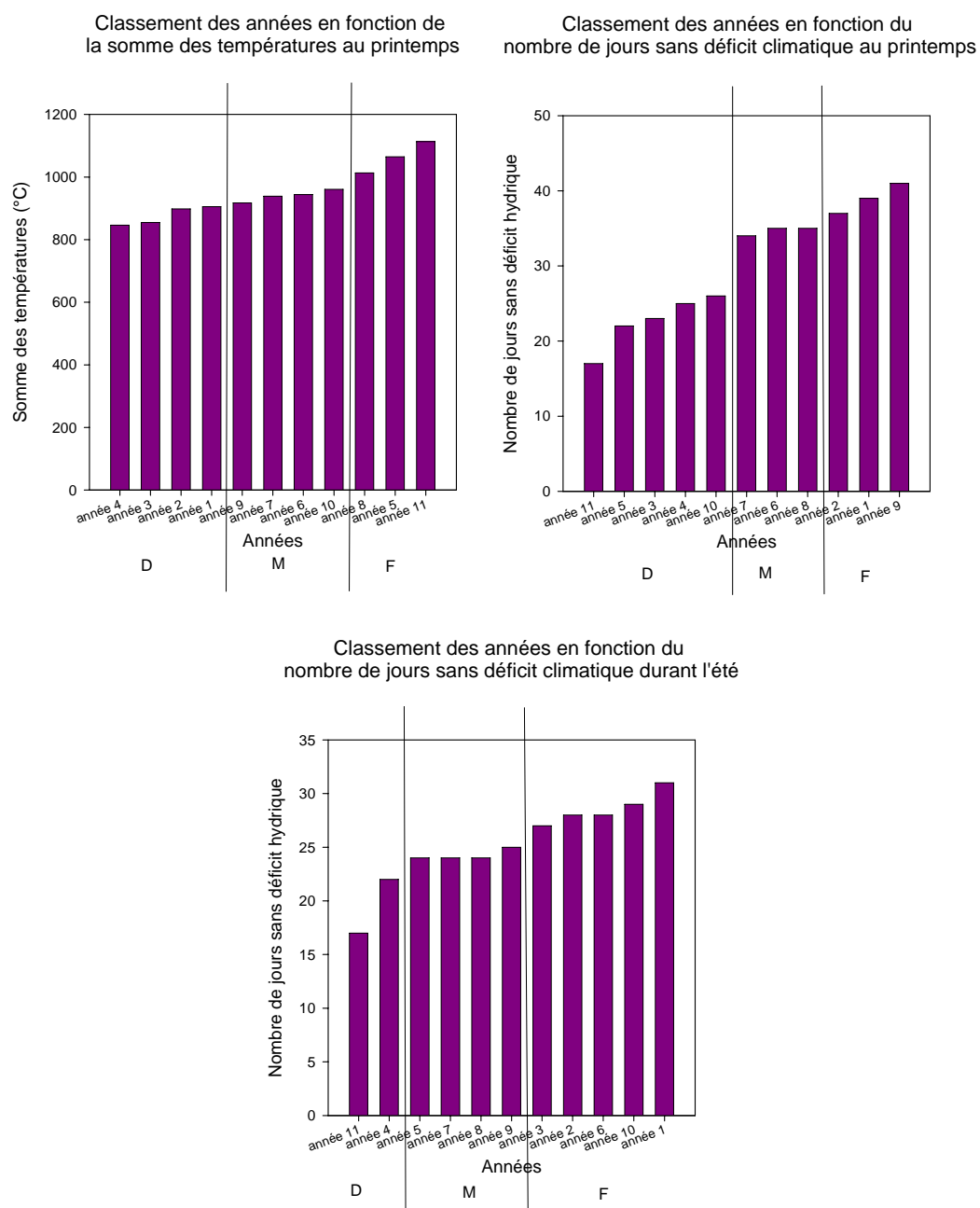


Figure 27 : Classement des années climatiques de la station de Marcenat

1.1.3 Les deux types de diversité du territoire utilisés

Les effets de deux territoires ayant des niveaux de diversité différents sont évalués.

Toutefois, nous avons veillé à ce que les territoires testés se caractérisent par le même niveau de productivité afin que les différences constatées lors de simulations proviennent bien de leur diversité et non de leurs différences de productivité.

Ce niveau de productivité a été établi en calculant la moyenne sur plusieurs années de la biomasse récoltée en deux fauches successives. Ces fauches intervenaient à des dates prédéfinies et concernaient l'ensemble des parcelles composant le territoire. Le tableau 32 présente la biomasse moyenne récoltée sur ces territoires ainsi que le coefficient de variation de cette production, indicateur de sa variabilité inter-annuelle.

La construction des territoires a été itérative. Au départ deux territoires ont été construits ; les proportions des différentes modalités des attributs parcellaires étant inspirées du suivi. Ensuite, par tâtonnement, les modalités des attributs ont été modifiées de façon à obtenir le même niveau de productivité.

Les deux territoires se distinguent par la diversité en interaction avec le climat (tableaux 33 et 34) : altitude, exposition, RU, type de végétation ; les caractéristiques sans interaction avec le climat étant identiques et peu contraignantes.

Les modalités choisies pour ces attributs (gradient d'altitude de 200 m, seuil de distance des parcelles, types de végétation représentés) sont inspirées du suivi (tableau 33). Ainsi les prairies de type 1 ne sont pas représentées car préférentiellement associées à des modes de conservation précoces. Les prairies de type 5 ne sont pas non plus représentées car associées aux lots d'animaux à l'entretien. Le gradient d'altitude choisi (200 m) est suffisamment marqué pour induire des différences en termes de croissance de l'herbe mais néanmoins représentatif des gradients d'altitude retrouvés au sein du suivi. Le seuil de distance choisi correspond à celui rencontré dans les exploitations sans salle de traite mobile.

Pour ces deux territoires, le chargement est identique et fixé à 1 UGB par hectare ce qui est représentatif des exploitations suivies et de l'Auvergne. Les surfaces des parcelles sont identiques et fixées arbitrairement à 1 hectare pour faciliter les calculs. Les deux territoires comportent dans les deux cas 17 parcelles, compromis choisi en fonction :

- du chargement instantané ; le chargement global étant de 1 UGB par hectare, le nombre de parcelles choisi équivaut à l'effectif du troupeau. Compte tenu de la surface

d'une parcelle, cet effectif ne doit être ni trop petit (sinon le temps de séjour des animaux y serait très long) ni trop important (sinon le temps de séjour serait très court) ;

- de la durée du traitement des sorties.

Tableau 32 : Productivité des territoires "peu diversifié" et "diversifié" établie à partir de la quantité de matière sèche (MS) récoltée à deux dates pré-définies

	Territoire peu diversifié	Territoire diversifié
Quantité moyenne récoltée 1^{ère} coupe (27/06)	105.71 t	105.85 t
Coefficient de variation	0.19	0.19
Quantité moyenne récoltée 2^{ème} coupe (18/08)	35.24 t	34.99 t
Coefficient de variation	0.23	0.23
Cumul sur 11 années des quantités de MS récoltée	2.0086*10 ³ t	2.0068*10 ³ t

(moyenne établie pour la station de Landos uniquement présentée)

Tableau 33 : Description des territoires "peu diversifié" et "diversifié"

Attributs	Modalités	Territoire peu diversifié	Territoire diversifié
Distance au siège de l'exploitation	≤ 600 m	100%	100 %
	> 600 m	-	-
Fauchable	Fauchable	100%	100 %
	Non fauchable	-	-
Altitude	Altitude station	76 %	53 %
	200 m de moins	24 %	47 %
Exposition	Plate	76 %	47 %
	Sud	12 %	24 %
	Nord	12 %	29 %
RU	50 mm	82 %	65 %
	30 mm	18 %	35 %
Type de végétation	2	12 %	24 %
	3	59 %	41 %
	4	29 %	35 %

Tableau 34 : Ecart-types des principaux attributs

	Territoire peu diversifié	Territoire diversifié
Altitude (m)	85	100
Exposition (0 à 2)	0,68	0,86
RU (mm)	7,62	9,56
Type de végétation (2 à 4)	0,62	0,76

1.1.4 Simuler pour chaque type de territoire, différentes organisations spatiales

Au sein du fichier d'entrée décrivant l'exploitation, les parcelles sont disposées en colonne en fonction de leur ordre de création. Chacune des parcelles est caractérisée par ses différents attributs (section 2.3 du chapitre 6). L'ordre des parcelles dans le fichier ainsi que leur distance au siège de l'exploitation sont susceptibles d'influer sur les affectations de parcelles (section 5.2 du chapitre 6). Changer la distance des parcelles au siège de l'exploitation ou leur ordre au sein du fichier d'entrée équivaut à définir une nouvelle organisation spatiale. Aussi avons nous choisi de décliner chaque niveau de diversité du territoire en trois organisations spatiales différentes. En d'autres termes, pour un niveau de diversité donné, les parcelles des trois organisations sont identiques si l'on considère leur type de végétation, leur altitude, leur RU ou leur exposition mais ne sont pas agencées de la même façon (figure 28).

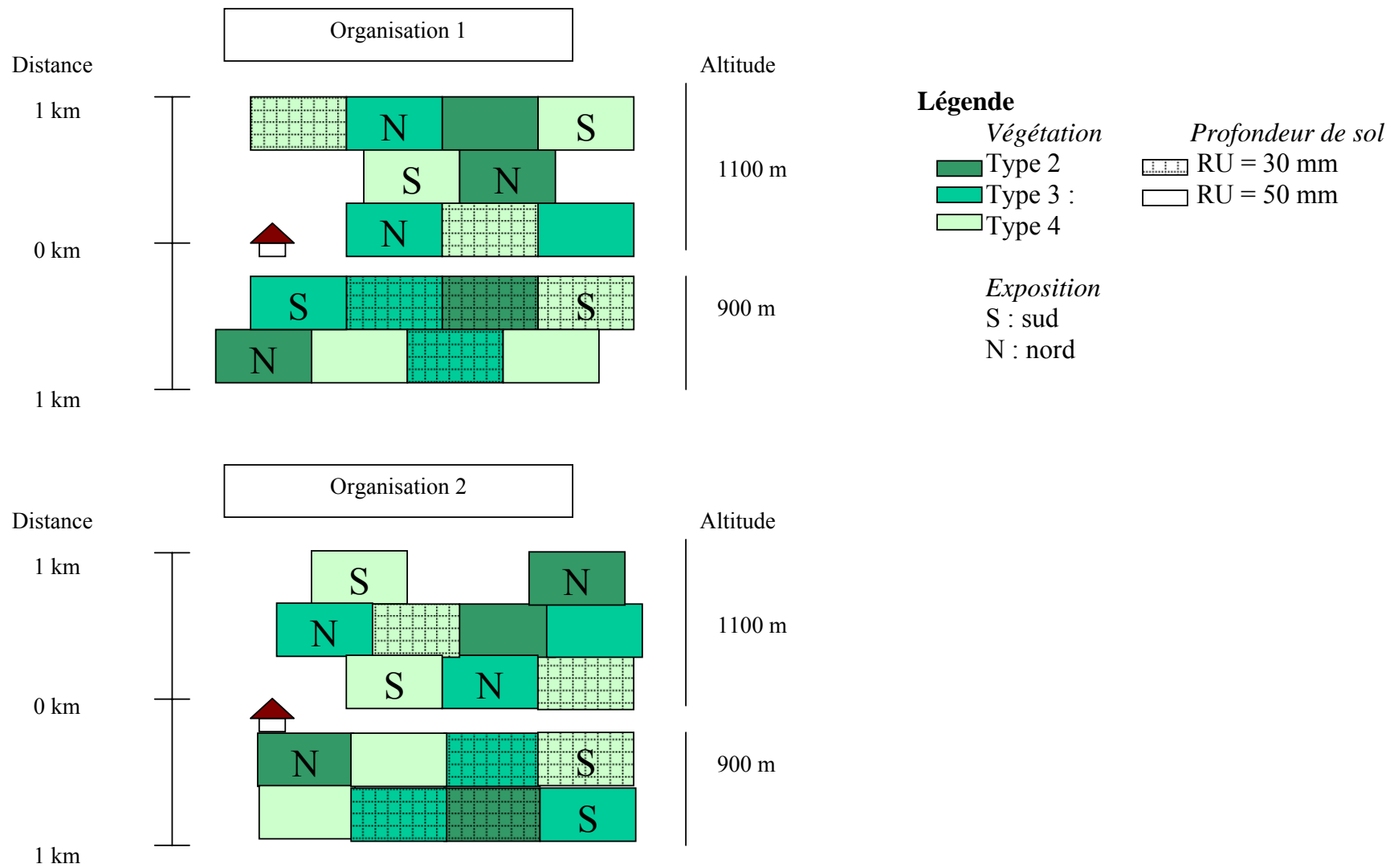


Figure 28 : Deux organisations différentes du territoire diversifié

1.2 Indicateurs d'évaluation des scénarios

L'ensemble des combinaisons Climat*Stratégie*Territoire aboutit à 36 scénarios. Pour chacun d'entre eux, 11 années sont simulées sur un pas de temps journalier. Le nombre de données disponibles est donc important. Pour évaluer la variabilité des résultats de production de chaque scénario et donc sa sensibilité aux aléas climatiques, nous avons choisi de relever au sein de ces nombreuses sorties deux types d'indicateurs pour chaque année simulée :

- des indicateurs globaux qui traduisent à la fois la conduite du pâturage et des ateliers de production de fourrages stockés ;
- des indicateurs spécifiques à l'atelier foin de première coupe.

Les indicateurs globaux correspondent :

- aux distributions de foin au pâturage, elles sont traduites en « jours de consommation pour le troupeau » (les kilogrammes de matière sèche sont divisés par la consommation journalière du troupeau) ;
- aux achats de stocks (en jours de consommation pour le troupeau) ;
- aux ventes de stocks (en jours de consommation pour le troupeau) ;
- à la date de mise à l'herbe (elle dépend de la quantité d'herbe sur pied et de la portance et est exprimée en jour julien) ;
- à la date de rentrée des animaux à l'étable (elle dépend des températures moyennes et de la portance et est exprimée en jour julien) ;

Les achats traduisent un déficit entre l'offre fourragère (fournie selon la localisation du troupeau par le pâturage et/ou par les fourrages stockés) et la demande alors que les ventes dépendent en premier lieu de la capacité du bâtiment. Ils s'écrivent selon les inégalités suivantes :

Si Biomasse disponible < Besoins du troupeau alors :

$$\text{Achats} = \text{Besoins du troupeau} - \text{Biomasse disponible}$$

Si Biomasse stockée + Reports de stocks > Capacité de la grange alors :

$$\text{Ventes} = \text{Biomasse stockée} + \text{Reports de stocks} - \text{Capacité de la grange}$$

Les distributions de foin au pâturage traduisent une offre au pâturage insuffisante par rapport aux besoins du troupeau.

Les dates de mise à l'herbe et de rentrée des animaux à l'étable délimitent la durée la campagne.

Les indicateurs spécifiques à l'atelier « foin de première coupe » correspondent à :

- la biomasse récoltée (en jours de consommation pour le troupeau) ;
- la qualité du foin (1, 2 ou 3) (dépend de la séquence sans pluie, du stade et de la quantité d'herbe sur pied et est exprimée en pourcentage de foin récolté) ;
- la date de début de l'atelier (dépend de la séquence sans pluie, du stade et de la quantité d'herbe sur pied et est exprimée en jour julien) ;
- la date de fin de l'atelier (dépend de la séquence sans pluie, du stade, de la quantité d'herbe sur pied, et du nombre d'hectares fauchables par jour et est exprimée en jour julien).

A partir de ces indicateurs fournis par le modèle, nous proposons de construire un indicateur synthétique I_s . I_s traduit en jours la biomasse totale prélevée soit par pâturage, soit pour la constitution de stocks fourragers.

$I_s = \text{Date de rentrée à l'étable} - \text{Date de mise à l'herbe} - \text{Distributions de foin au pâturage} + \text{Biomasse stockée}$

1.3 Le traitement des données

1.3.1 Pour chaque scénario

Pour l'ensemble des indicateurs permettant de décrire et d'évaluer les résultats d'un scénario, nous calculons dans un premier temps la moyenne des 11 années. Elle donne une appréciation de la tendance générale du scénario. Nous calculons ensuite la variabilité de ces indicateurs sur ces 11 années puisque l'enjeu principal des simulations est de déterminer quels scénarios permettent de réduire la variabilité des résultats de production entre années.

Le coefficient de variation ne paraît pas adapté car il est très sensible à la valeur moyenne. Le critère choisi pour caractériser cette variabilité est donc l'écart-type.

1.3.2 Comparaison des scénarios

La confrontation des résultats des différents scénarios permet de mettre en évidence :

- l'effet **stratégie de décision** à partir de la comparaison pour un climat et un territoire donnés :
 - des 12 scénarios associés à la stratégie 2 à ceux associés à la stratégie 1 (figure 24),
 - des 12 scénarios associés à la stratégie 3 à ceux associés à la stratégie 1,
 - des 12 scénarios associés à la stratégie 3 à ceux associés à la stratégie 2 ;
- l'effet **type de territoire** à partir de la comparaison, pour une stratégie donnée, des 18 scénarios associés aux territoires peu diversifiés aux 18 scénarios associés aux territoires diversifiés ;
- l'effet **organisation spatiale** en évaluant pour un type de territoire et une stratégies donnés, la variabilité des résultats obtenus avec les trois organisations ;
- l'effet **climat** à partir de la comparaison, pour une stratégie donnée, des résultats obtenus à Landos (18 scénarios) et Marcenat (18 scénarios).

L'étude de l'effet stratégie est suffisante pour tester nos hypothèses de travail. Cependant, la caractérisation de l'influence du territoire d'exploitation (type et organisation) ou du climat permet de fournir un éclairage plus complet sur la relation entre l'utilisation du territoire, sa diversité et la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques.

Plus que l'effet propre du facteur territoire d'exploitation ou du climat sur la production, c'est l'interaction entre les stratégies et le climat (ou le territoire d'exploitation) qui nous intéresse. On cherche alors à voir si pour un territoire et un climat donnés, les différences entre stratégies sont accentuées ou non.

Des analyses de variance permettent de s'assurer du caractère significatif ou non des différents facteurs.

2 Résultats

Pour les différents indicateurs, nous passons en revue dans un premier temps l'influence moyenne de la stratégie, du climat et du territoire d'exploitation (section 2.1). Ensuite nous caractérisons la variabilité des résultats de production (section 2.2).

2.1 Tendance générale des facteurs stratégie, climat et territoire

Après avoir décrit l'influence moyenne des stratégies sur les différents indicateurs, nous nous intéressons à l'influence moyenne du climat puis du territoire d'exploitation.

2.1.1 Effet stratégie

2.1.1.1 Récoltes de fourrages stockés

La stratégie 2 permet des récoltes moyennes de fourrages conservés toujours supérieures à celles de la stratégie 1 (figure 29) quel que soit le territoire d'exploitation ou le climat (12 scénarios sur 12). Le gain moyen par rapport à la stratégie 1 est de 16,2 jours d'alimentation.

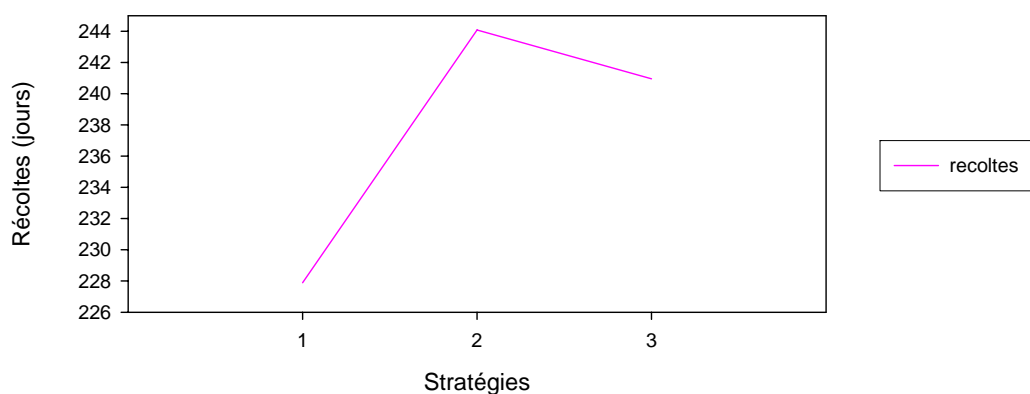


Figure 29 : Récoltes moyennes de fourrages stockés en fonction de la stratégie

Il en est de même pour la stratégie 3. Elle permet des récoltes toujours supérieures à celles de la stratégie 1, soit en moyenne 13,1 jours d'alimentation supplémentaires.

Si l'on compare les stratégies 2 et 3 entre-elles, on constate que la stratégie 2 permet des récoltes moyennes plus importantes que la stratégie 3 dans 9 scénarios sur 12. Les différences entre les stratégies 2 et 3 sont cependant bien moindres qu'avec la stratégie 1.

Ces différences entre stratégies sont significatives (Tableau 35).

Tableau 35 : Analyse de variance de l'effet stratégie

	Mise à l'herbe	Début de l'atelier foin	Fin de l'atelier	Rentrée	Récoltes	Distributions de stocks au pâturage	Ventes	Achats	Proportion de foin de qualité médiocre	Indicateur synthétique
F	299,87	0,69	511,69	2,19	113,31	50,56	178,49	22,23	39,88	178,88
probabilité	0,0000	0,5079	0,0000	0,1342	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
n	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36

Les productions plus importantes des stratégies 2 et 3 comparativement à la stratégie 1 sont liées à l'affectation des parcelles les plus productives aux ateliers de production de fourrages stockés. Les productions plus importantes de la stratégie 2 par rapport à la stratégie 3 dans 9 scénarios sur 12 résultent de l'ordre d'utilisation des parcelles. Avec la stratégie 3, les parcelles les plus productives sont souvent les plus précoces (végétation de type 2, altitude inférieure) et récoltées en premier. Avec la stratégie 2, l'ordre de fauche dépend de l'organisation du territoire (section 2.1.3.2). Cela signifie que si plusieurs parcelles présentent les conditions pouvant déclencher la fauche, la parcelle la plus productive ou la plus précoce (au sein des parcelles productives affectées à l'atelier foin) ne sera pas nécessairement fauchée en premier. Elle pourra même l'être en dernier en fonction de sa place dans l'organisation du territoire. Les quantités récoltées avec cette stratégie sont alors supérieures mais avec des répercussions sur la qualité que nous abordons dans la section 2.1.1.9.

2.1.1.2 Distributions de foin au pâturage

La stratégie 2 entraîne une légère augmentation (de 2,2 jours) des distributions de stocks au pâturage dans 8 scénarios sur 12. Considérant les 12 scénarios, les quantités distribuées sont identiques entre les deux stratégies (figure 30).

La stratégie 3 entraîne une diminution (de 9,3 jours) des distributions de stocks au pâturage dans tous les scénarios.

Par rapport à la stratégie 2, la stratégie 3 permet également de diminuer dans tous les scénarios les quantités de stocks distribuées au pâturage et cela dans les mêmes ordres de grandeur que pour la stratégie 1.

Ainsi l'affectation des parcelles les moins productives au pâturage tend à augmenter les distributions (stratégie 2). En revanche la prise en compte de la diversité dans l'ordonnancement de l'atelier pâturage (stratégie 3) permet de diminuer les distributions de foin au pâturage par rapport à la stratégie témoin.

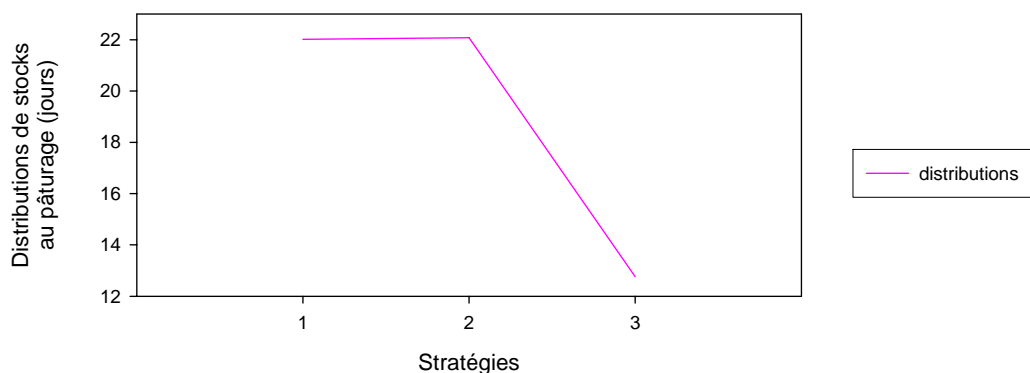


Figure 30 : Distributions moyennes de foin au pâturage en fonction de la stratégie

2.1.1.3 Ventes de foin

Les ventes de stocks sont systématiquement augmentées avec la stratégie 2 (figure 31). Par rapport à la stratégie témoin, cette augmentation correspond à 9 jours d'alimentation. La stratégie 3 permet également une augmentation systématique des ventes de stocks. Elle correspond à 12,4 jours d'alimentation.

La comparaison des stratégies 2 et 3 montre que la stratégie 3 permet une augmentation des ventes correspondant à 3,4 jours.

Les ventes plus importantes avec les stratégies 2 et 3 sont liées à l'augmentation des récoltes et également (pour la stratégie 3 en particulier) aux distributions au pâturage inférieures.

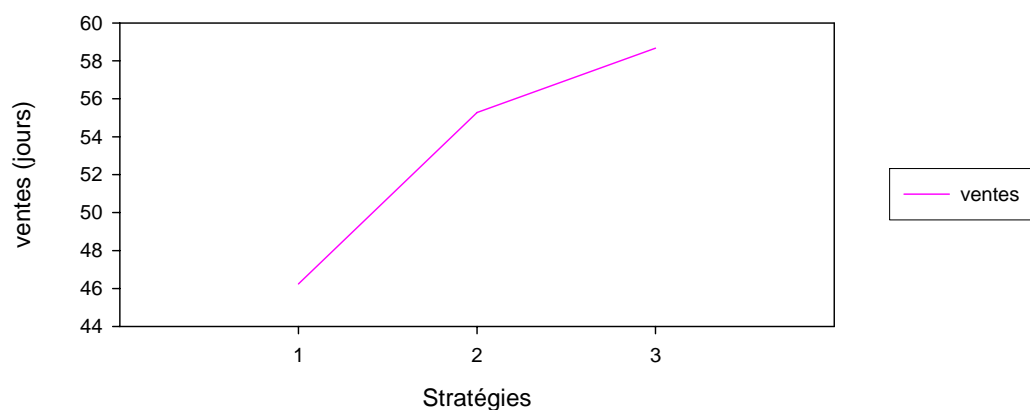


Figure 31 : Ventes moyennes de fourrages stockés en fonction de la stratégie

2.1.1.4 Achats de foin

A Marcenat, quelle que soit la stratégie, il n'y a aucun achat de foin. A Landos, la stratégie 2 permet une légère diminution (1,1 jours d'alimentation) des achats dans 5 scénarios sur 6 (figure 32). Pour la stratégie 3, la diminution est plus importante et équivaut à 3,1 jours d'alimentation.

On peut donc dire que les stratégies 2 et 3, et plus particulièrement la stratégie 3, permettent de diminuer les achats de foin. Ceci est lié aux récoltes plus importantes de stocks fourragers elles mêmes liées à l'affectation des parcelles productives à la production de stocks. Mais dans le cas de la stratégie 3, cette diminution des achats résulte également de la diminution des distributions au pâturage permise par l'ordonnancement raisonné des parcelles de pâturage.

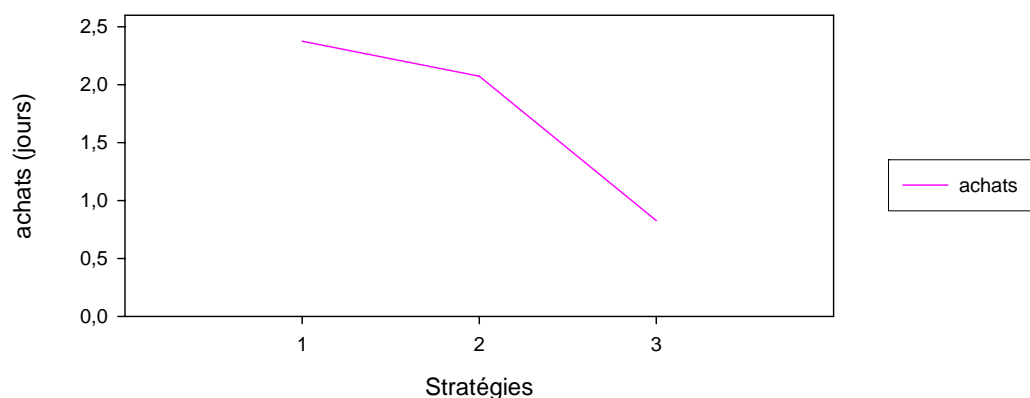


Figure 32 : Achats moyens de fourrages en fonction de la stratégie

2.1.1.5 Date de mise à l'herbe

Avec les stratégies 2 et 3 on constate une date de mise à l'herbe plus tardive de 8,3 jours (figure 33). Le retard est du même ordre pour les stratégies 2 et 3.

Les mêmes tendances entre les stratégies 2 et 3 soulignent que c'est l'affectation des parcelles à l'atelier pâturage, et non leur ordre d'utilisation qui retarde la mise à l'herbe. Les parcelles les plus productives ayant été réservées aux ateliers de production de fourrages conservés, il faut plus de temps qu'avec la stratégie 1 pour atteindre le seuil de 15 jours d'avance au pâturage déclenchant la mise à l'herbe. Elle se trouve donc retardée.

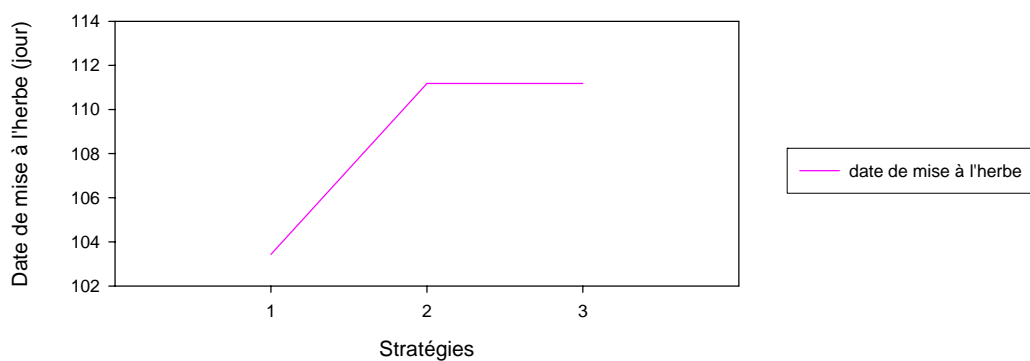


Figure 33 : Date de mise à l'herbe en fonction de la stratégie

2.1.1.6 Date de rentrée à l'étable

Les dates de rentrée des animaux à l'étable sont identiques d'une stratégie à l'autre quel que soit le territoire d'exploitation ou le climat. Ce sont les conditions climatiques qui déclenchent la rentrée, d'où des dates identiques toutes stratégies confondues.

2.1.1.7 Date de début de l'atelier foin

Les dates de début de l'atelier foin sont identiques d'une stratégie à l'autre quel que soit le territoire d'exploitation ou le climat. Ceci résulte du fait que c'est la phénologie le principal facteur limitant du début de la récolte. Les types de végétation exercent l'influence la plus importante sur la précocité. Les parcelles de types 2 ou 3 étant affectées dans toutes les stratégies aux ateliers de production de fourrages stockés, il en résulte que les dates sont identiques.

2.1.1.8 Date de fin de l'atelier foin

Les dates de fin de l'atelier foin sont retardées avec les stratégies 2 et 3 (figure 35) ; la stratégie 2 induisant un retard plus conséquent (6 jours) que la stratégie 3 (2 jours).

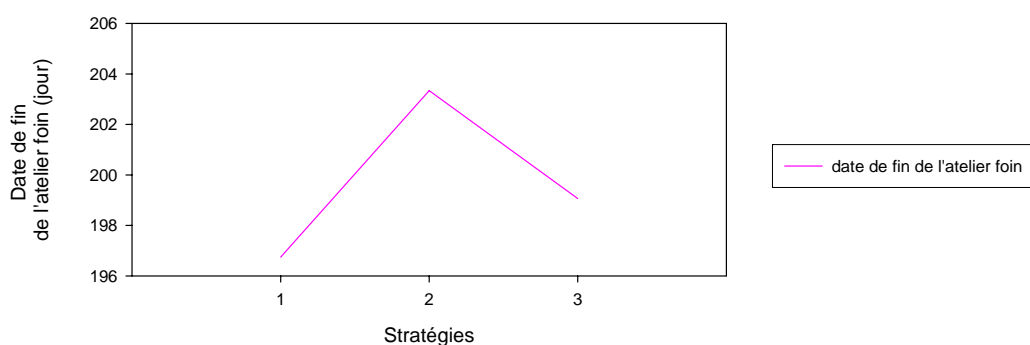


Figure 34 : Date de fin de l'atelier foin en fonction de la stratégie

2.1.1.9 Qualité du foin

Avec la stratégie 2, la proportion de foin médiocre tend à augmenter (7 scénarios sur 12). Considérant les 7 scénarios où la qualité augmente, l'augmentation est de 7,8 %. Elle est de 3,6 % si l'on considère les 12 scénarios (figure 34).

L'effet de la stratégie 3 sur la proportion de foin de qualité médiocre est plus net : dans 11 scénarios sur 12, cette proportion diminue (de 8,1 %) par rapport à la stratégie témoin.

En comparant les stratégies 2 et 3 entre elles, on constate que la stratégie 3 permet une diminution de la proportion de foin de qualité médiocre dans 10 scénarios sur 12. Les différences entre stratégies pour cet indicateur sont alors plus marquées qu'avec la stratégie témoin.

On peut donc conclure que l'ordre d'utilisation des parcelles permet de diminuer la proportion de foin de qualité médiocre.

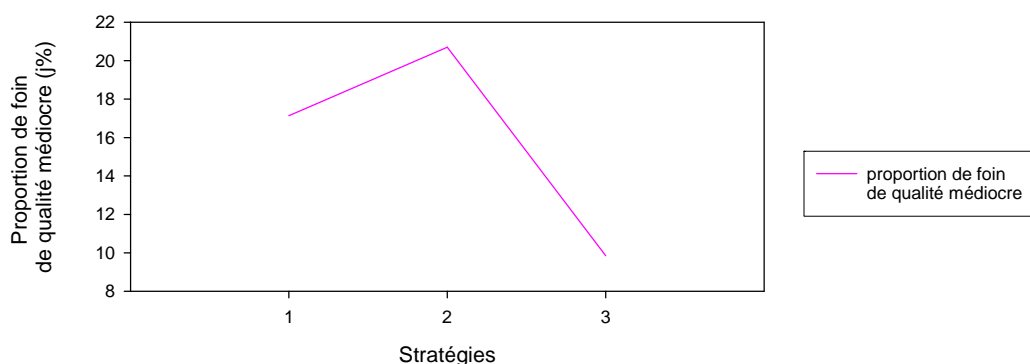


Figure 35 : Proportion de foin de qualité médiocre en fonction de la stratégie

2.1.1.10 L'indicateur synthétique

Ainsi, la stratégie 2 permet d'augmenter les quantités de stocks récoltées par rapport à la stratégie 1 (tableau 36). Cela se traduit par ventes plus importantes et des achats moindres et ce malgré l'augmentation des distributions de foin au pâturage et des dates de mise à l'herbe plus tardives. La proportion de foin de qualité médiocre est également augmentée. La stratégie 3 conduit, elle aussi, à une augmentation des quantités de stocks récoltées, des ventes, une diminution des achats et des dates de mise à l'herbe plus tardives. En revanche la proportion

de foin de qualité médiocre et les distributions sont diminuées par rapport à la stratégie témoin.

L'indicateur synthétique condense les effets de plusieurs indicateurs (section 1.2). On constate qu'il augmente de 8 jours avec la stratégie 2, de 14 jours avec la stratégie 3. Les stratégies mettant à profit la diversité du territoire permettent donc d'augmenter en moyenne les prélèvements de biomasse.

Tableau 36 : Tableau récapitulatif des principaux résultats

	S1	S2	S3
Distributions au pâturage (jours)	22,0	22,1	12,8
Date de mise à l'herbe (jour)	103	111	111
Foin de qualité médiocre (%)	17,1	20,7	9,9
Récoltes (jours)	227,9	244,1	241,0
Indicateur synthétique (jours)	400	408	414

2.1.2 Effet climat

A Marcenat, les récoltes de fourrages stockés sont supérieures de 53 jours à celles de Landos. Ces récoltes plus importantes sont liées à la pluviométrie qui est un facteur limitant de la production à Landos. Il en résulte, pour un même territoire et une même stratégie, une absence d'achats à Marcenat et des ventes supérieures. Les distributions de stocks au pâturage sont inférieures à Marcenat de 12 jours en moyenne. Les dates de mise à l'herbe sont plus précoces, les dates de rentrée à l'étable également à cause des problèmes de portance à l'automne induits par la pluviométrie. Si à Marcenat la pluviométrie favorise la production potentielle, elle est un facteur limitant de la date de récolte. Elle la retarde en effet de 4 jours par rapport à Landos pour les territoires diversifiés. Les quantités de stocks s'en trouvent augmentées mais la proportion de foin de qualité médiocre également augmentée.

Si on s'intéresse plus spécifiquement à l'interaction climat-stratégie et que l'on compare les stratégies 2 et 1, on constate qu'à Marcenat, la stratégie 2 permet une augmentation moyenne

des récoltes de stocks correspondant à 18,8 jours contre 13,6 jours à Landos (figure 36). La stratégie 2 permet une augmentation des ventes de 12,9 jours à Marcenat contre 5,2 à Landos. Concernant les distributions au pâturage, les différences entre stratégies sont peu marquées à Landos comme à Marcenat (plus 1,1 jours à Landos, moins 1 jour à Marcenat). La qualité du foin décroît (de 8,2 %) dans 5 scénarios sur 6 à Marcenat et augmente (de 1,1 %) dans 4 scénarios sur 6 à Landos. La date de mise à l'herbe est retardée de 9 jours à Marcenat contre 7,5 jours à Landos. La date de début de l'atelier foin est retardée de 2 jours à Marcenat, elle est identique à Landos. La date de fin de l'atelier foin est retardée de 8,5 jours à Marcenat contre 3,5 jours à Landos. L'indicateur synthétique augmente de 12 jours à Marcenat contre 5 jours à Landos (tableau 37).

Par rapport à la stratégie 1, la stratégie 3 permet une augmentation moyenne des récoltes de stocks correspondant à 19 jours d'alimentation à Marcenat contre 13,6 jours à Landos. Elle permet une augmentation moyenne des ventes de 17,7 jours à Marcenat contre 7,2 jours à Landos. On constate également une diminution de la proportion de foin médiocre de 9 % à Marcenat contre 5,6 % à Landos. En revanche, la stratégie 3 permet une diminution des distributions plus importantes à Landos (10,1 jours) qu'à Marcenat (8,4 jours). La date de mise à l'herbe est retardée de 9 jours à Marcenat contre 7,5 jours à Landos. La date de fin de l'atelier foin est retardée dans les mêmes proportions (2 jours) à Landos et à Marcenat. L'indicateur augmente de 18 jours à Marcenat contre 10 jours à Landos.

Quel que soit le climat, les tendances constatées de l'effet stratégie pour les différents indicateurs sont conservées, c'est à dire que le sens des inégalités entre stratégies (décrites dans la section 2.1.1) reste identique. De plus, on constate que le climat de Marcenat accentue l'effet stratégie puisque les différences entre stratégies y sont plus importantes.

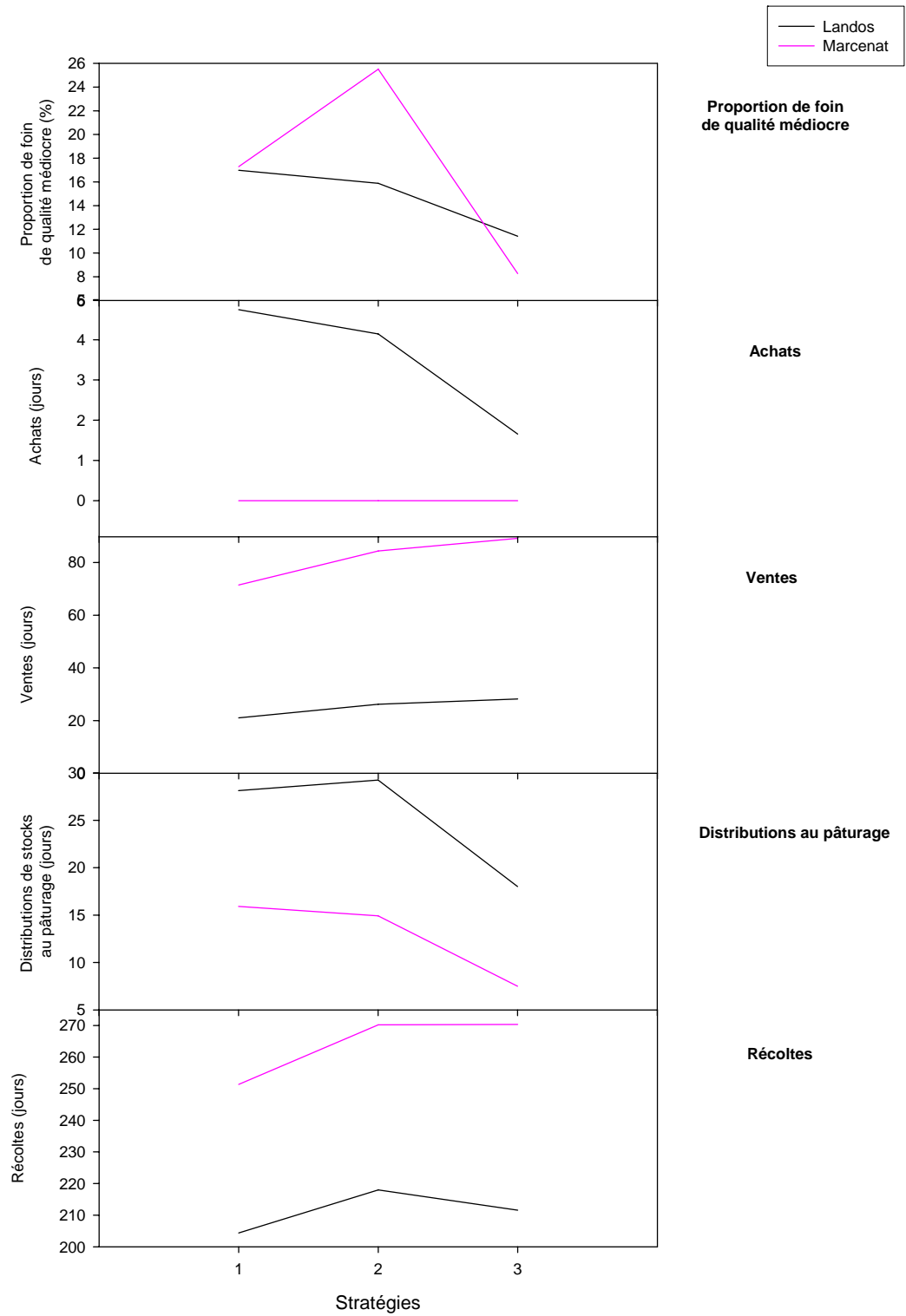
L'analyse de variance montre des interactions statistiquement significatives pour les récoltes, les ventes, les achats, la date de fin de l'atelier foin, la proportion de foin de qualité médiocre et l'indicateur synthétique (tableau 38).

Tableau 37 : Moyenne et écart-type de l'indicateur synthétique (en jours)

	Landos		Marcenat		Territoires peu diversifiés		Territoires diversifiés	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Stratégie 1	368	50	431	55	411	58	388	48
Stratégie 2	374	50	443	59	416	57	401	52
Stratégie 3	379	58	449	59	424	61	404	56

Tableau 38 : Analyse de variance de l'interaction stratégie-climat

	Date de fin de l'atelier foin	Récoltes	Ventes	Achats	Proportion de foin de qualité médiocre	Indicateur synthétique
F	85,35	13,39	31,91	22,23	14,21	16,06
probabilité	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000
n	36	36	36	36	36	36



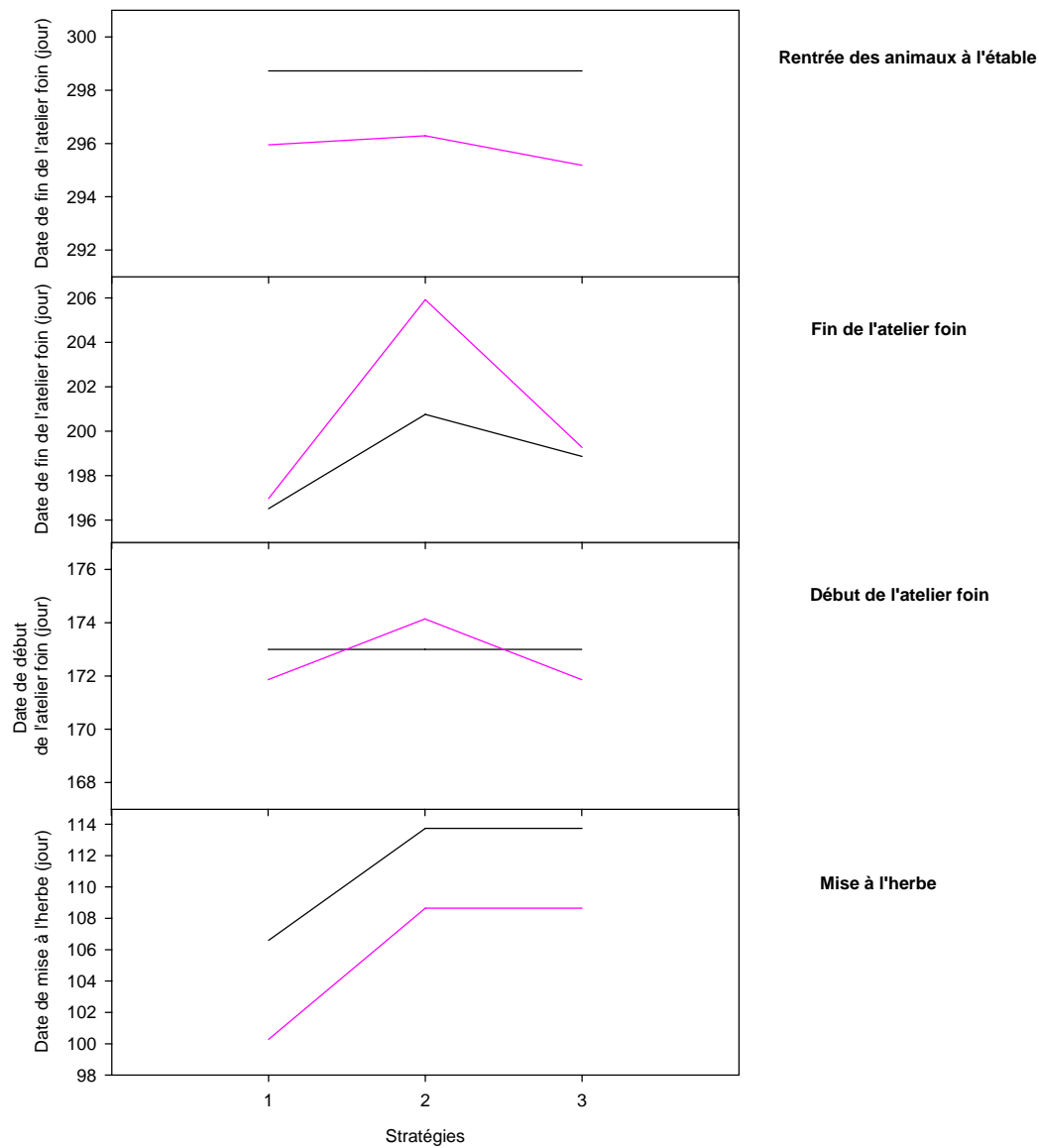


Figure 36 : Interaction stratégie-climat

2.1.3 Effet territoire d'exploitation

Deux effets sont étudiés : le niveau de diversité du territoire, l'organisation du territoire pour un niveau de diversité donné.

2.1.3.1 Le niveau de diversité du territoire

Toutes stratégies confondues on constate que les territoires peu diversifiés permettent une augmentation des récoltes de 16,5 jours par rapport aux territoires diversifiés. Il en résulte que les ventes de stocks sont plus importantes avec les territoires peu diversifiés (de 17,5 jours) et les achats moindres. En revanche les distributions de stocks au pâturage sont un peu plus importantes de 2,7 jours. Cela signifie qu'avec les territoires peu diversifiés, les parcelles de pâturage sont moins productives mais les parcelles de fourrages stockés plus productives. La détermination initiale de la productivité des territoires d'exploitation prenait en compte l'ensemble des parcelles du territoire (section 1.1.3) et ne tenait pas compte des affectations de parcelles aux différents ateliers, d'où ce décalage non décelé entre les deux types de territoires.

Concernant l'interaction entre stratégie et niveau de diversité du territoire, si on compare la stratégie 2 à la stratégie 1, on constate que la production de stocks est augmentée de 24,1 jours avec les territoires diversifiés contre 8,2 jours avec les territoires peu diversifiés (figure 37). Les ventes sont augmentées de 12,4 jours avec les territoires diversifiés contre 5,7 avec les territoires peu diversifiés. La date de mise à l'herbe est retardée de 12,9 jours avec les territoires diversifiés contre 2,6 jours avec les territoires peu diversifiés. La date de fin de l'atelier foin est retardée de 9,7 jours avec les territoires diversifiés contre 3,6 jours avec les territoires peu diversifiés. L'effet de la stratégie 2 par rapport à la stratégie 1 sur les dates de début de l'atelier foin ou de rentrée des animaux à l'étable est du même ordre avec les territoires peu diversifiés et diversifiés. En revanche la proportion de foin de qualité médiocre est augmentée de 1,9 % avec les territoires diversifiés contre 5,2 % avec les territoires peu diversifiés. Les achats diminuent légèrement avec les territoires peu diversifiés et sont du même ordre que la stratégie témoin avec les territoires diversifiés. L'indicateur synthétique

augmente de 4 jours avec les territoires peu diversifiés et de 13 jours avec les territoires diversifiés.

Si on compare la stratégie 3 à la stratégie 1, la production de stocks est augmentée de 17,7 jours avec les territoires diversifiés contre 8,4 jours avec les territoires peu diversifiés. Les ventes sont augmentées de 12,9 jours pour les territoires diversifiés contre 12 jours pour les territoires peu diversifiés. Les distributions sont diminuées de 11,4 jours avec les territoires diversifiés contre 7,1 jours avec les territoires peu diversifiés. La date de mise à l'herbe est retardée de 12,9 jours avec les territoires diversifiés contre 2,6 jours avec les territoires peu diversifiés. La date de fin de l'atelier foin est quasiment identique avec les territoires peu diversifiés et retardée de 4,6 jours avec les territoires diversifiés. L'effet de la stratégie 3 par rapport à la stratégie 1 sur les achats et les dates de début de l'atelier foin ou de rentrée des animaux à l'étable est du même ordre pour les territoires peu diversifiés et diversifiés. La proportion de foin de qualité médiocre est diminuée de 4,4 % avec les territoires diversifiés contre 10,2 % avec les territoires peu diversifiés. L'indicateur synthétique augmente de 16 jours avec les territoires diversifiés contre 12 jours avec les territoires peu diversifiés.

Les tendances constatées de l'effet stratégie pour les différents indicateurs sont conservées. Les différences entre stratégies (lorsqu'on compare les stratégies 2 ou 3 à la stratégie témoin) sont plus marquées avec les territoires diversifiés qu'avec les territoires peu diversifiés et cela pour la plupart des indicateurs (hormis pour la proportion de foin de qualité médiocre et les achats).

L'analyse de variance montre des interactions statistiquement significatives pour les dates de mise à l'herbe et de fin de l'atelier foin, les récoltes, les ventes, la proportion de foin de qualité médiocre et l'indicateur synthétique (Tableau 39).

Tableau 39 : Analyse de variance de l'interaction stratégie-niveau de diversité du territoire

	Date de mise à l'herbe	Date de fin de l'atelier foin	Récoltes	Ventes	Proportion de foin de qualité médiocre	Indicateur synthétique
F	130,55	114,76	24,53	13,97	6,88	14,80
probabilité	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0040	0,0001
n	36	36	36	36	36	36

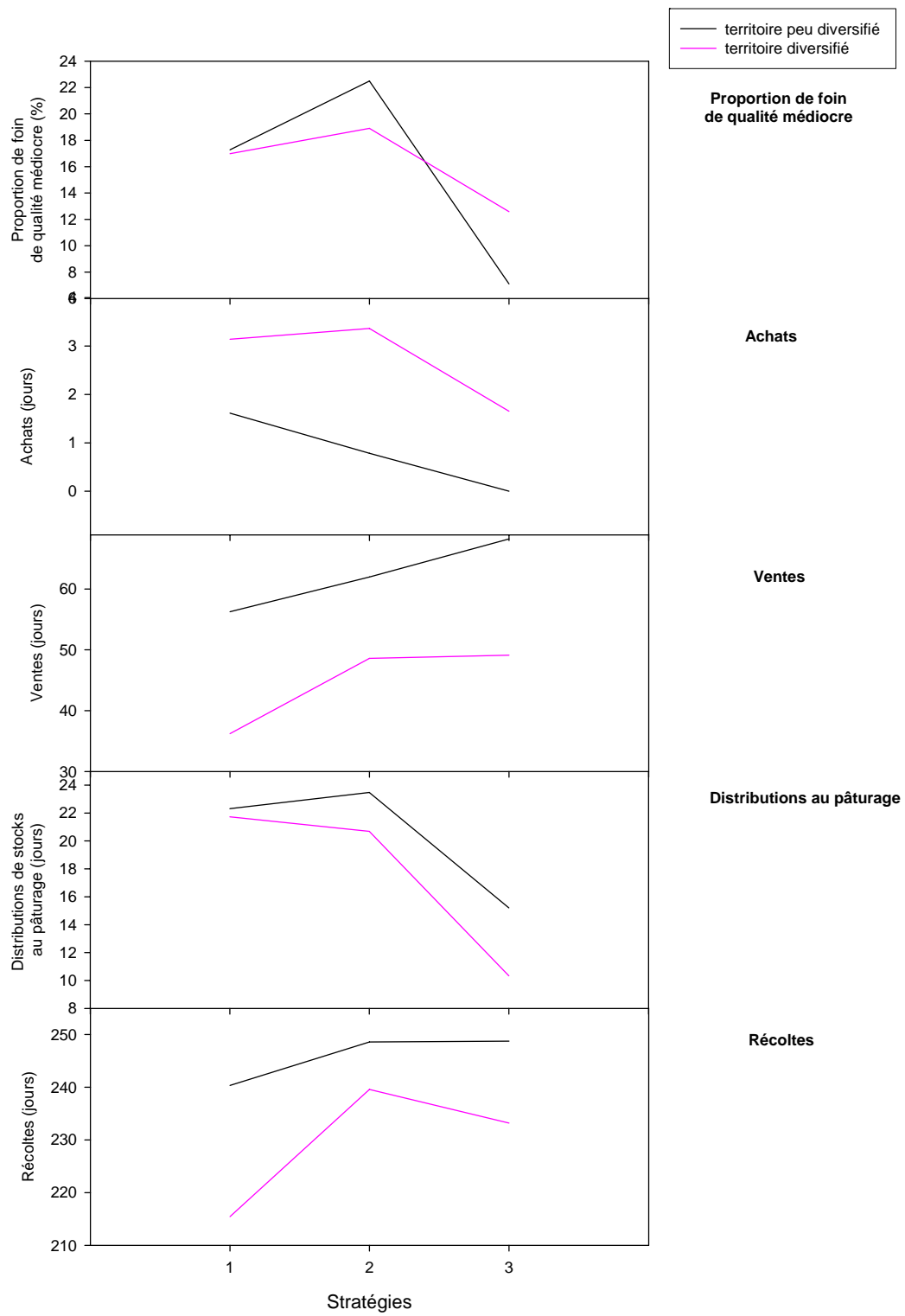
2.1.3.2 L'organisation du territoire

La stratégie 3 est peu sensible aux différentes organisations du territoire. Nous avons calculé pour une même stratégie, un même climat et niveau de diversité, le coefficient de variation des résultats obtenus avec les différentes organisations du territoire. A Marcenat, le coefficient de variation des résultats obtenus est égal à 0 pour les stocks récoltés, la qualité, les achats, les dates quel que soit le niveau de diversité. A Landos on trouve un coefficient de variation égal à 0 pour l'ensemble de ces indicateurs lorsque le territoire est diversifié. Lorsqu'il est peu diversifié le coefficient de variation reste faible concernant les ventes (2 %) ou les distributions (1 %) et nul pour les autres indicateurs.

Les stratégies 1 et 2 sont en revanche plus sensibles aux organisations du territoire d'exploitation et notamment pour la qualité et les achats de stocks qualité (coefficient de variation de l'ordre de 15 %).

Cette sensibilité contribue à plus ou moins accentuer les différences entre stratégies. Ainsi à Landos et pour un territoire diversifié, lorsque l'on compare la stratégie 2 à la stratégie 1, l'augmentation moyenne de la production de 19,5 jours correspond à une augmentation qui varie entre 11,8 et 29 jours. La sensibilité des stratégies 1 et 2 à l'organisation du territoire est néanmoins trop faible pour modifier la tendance générale de l'effet stratégie définie dans la section 2.1.1. Le sens des inégalités entre stratégies reste inchangé hormis dans 6 scénarios sur 36. Ainsi, si l'on considère par exemple les distributions de foin au pâturage et que l'on compare la stratégie 2 à la stratégie 1, on constate qu'elle entraîne une augmentation des distributions dans 8 scénarios sur 12. Pour les 4 autres scénarios, l'organisation du territoire induit un résultat différent de cette tendance.

La stratégie 3 prend en compte la diversité du territoire d'exploitation de façon plus précise que les autres stratégies : les affectations des différentes parcelles aux ateliers et leur ordre d'utilisation durant la campagne sont identiques d'une organisation du territoire d'exploitation à l'autre. Ceci explique l'absence de variation pour les différents indicateurs.



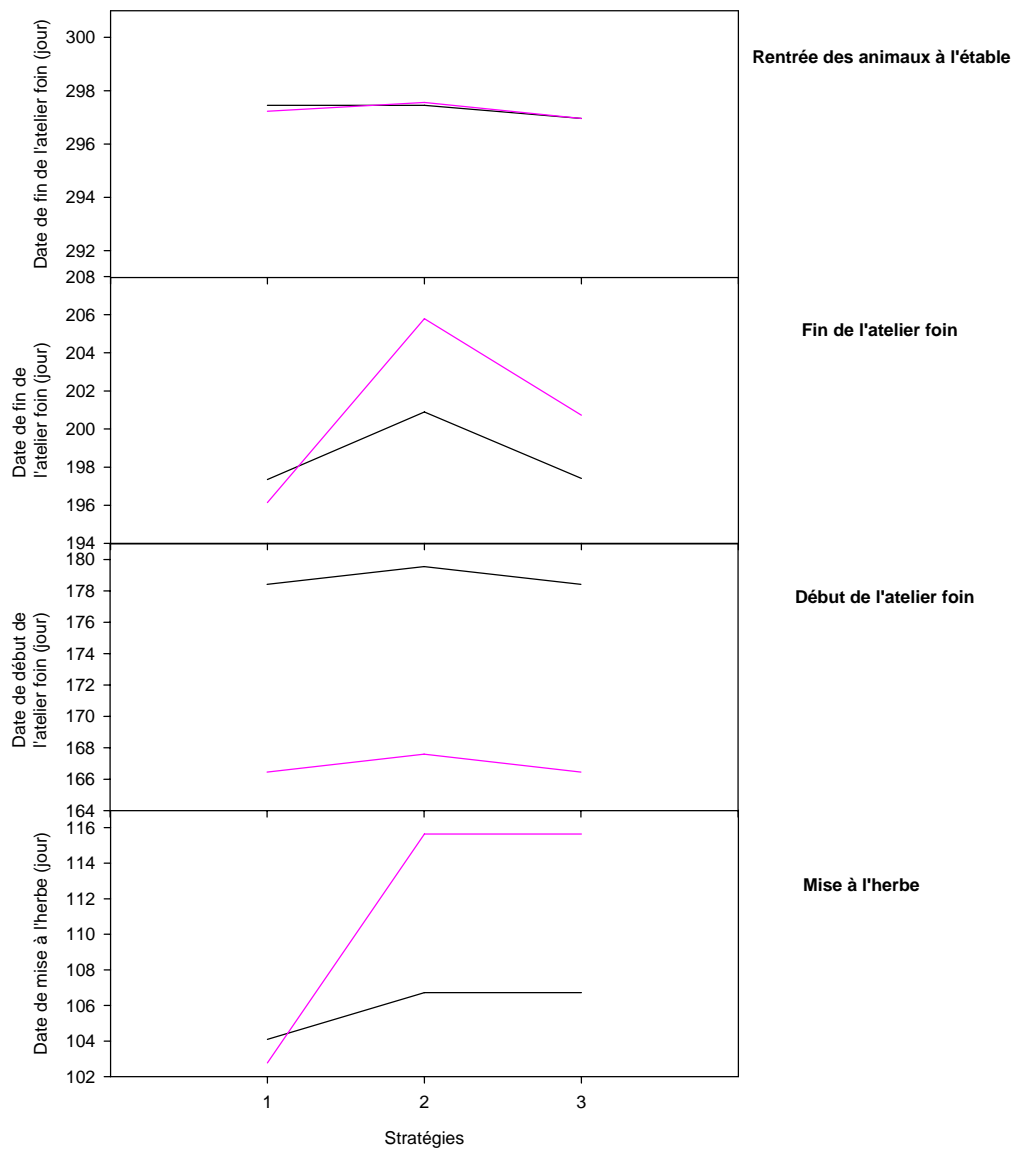


Figure 37 : Interaction stratégie-niveau de diversité du territoire

2.2 La variabilité des résultats de production

Nous avons émis l'hypothèse que la prise en compte de la diversité dans les règles de dimensionnement ou d'ordonnancement permet de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Cette sensibilité est définie comme la variabilité des résultats de production entre années. Nous calculons l'écart-type qui est un critère strict de cette variabilité.

2.2.1 Comparaison des stratégies 2 et 1

Pour la date de mise à l'herbe ou la date de rentrée à l'étable, les écart-types sont quasiment identiques entre stratégies (figure 38). Pour la date de début de l'atelier foin, l'écart-type obtenu avec la stratégie 2 est supérieur de 3,2 jours à celui obtenu avec la stratégie 1. Pour la date de fin de l'atelier foin, il est supérieur de 3,9 jours. Il en est de même pour les récoltes de stocks (plus 2,6 jours), les distributions au pâturage (plus 0,5 jour), les ventes (plus 3,8 jours), et enfin la proportion de foin de qualité médiocre (plus 4 jours). Pour les achats (qui n'ont eu lieu qu'à Landos), l'écart-type est inférieur de 0,9 jour.

On constate donc que par rapport à la stratégie 1, la stratégie 2 augmente la variabilité de la plupart des indicateurs considérés hormis les achats.

Les différences entre stratégies sont peu marquées pour certains indicateurs (dates de mise à l'herbe, date de rentrée à l'étable). Cela signifie que l'effet de la stratégie sur ces indicateurs est peu significatif, en d'autres termes les résultats restent variables.

En ce qui concerne l'indicateur synthétique (tableau 37), on constate que l'écart-type obtenu est légèrement supérieur à celui obtenu avec la stratégie 1.

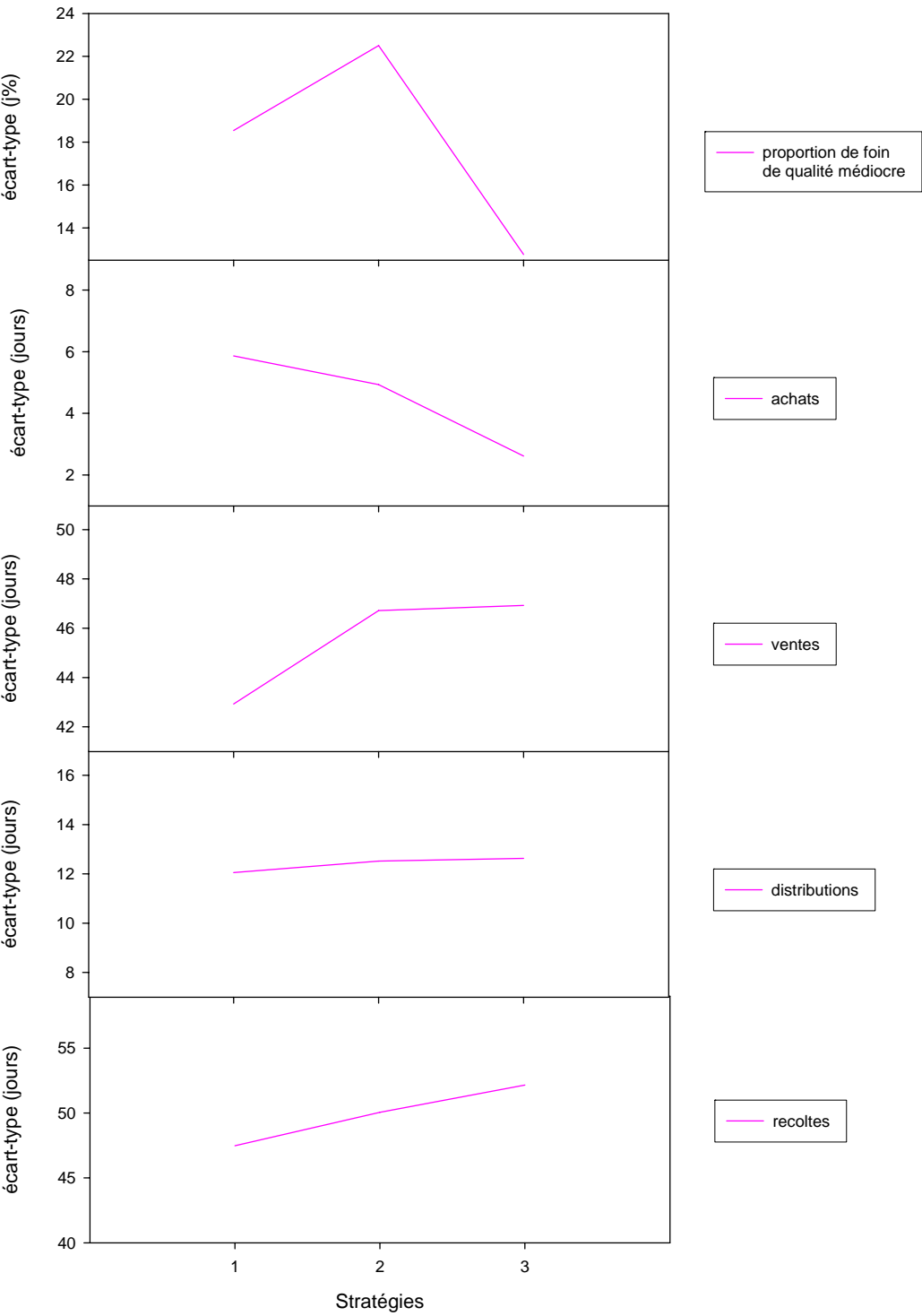
Le tableau 40 montre les indicateurs pour lesquels l'écart-type est significatif.

Tableau 40: Analyse de variance des écart-types pour la stratégie et ses interactions avec le climat et le niveau de diversité du territoire

		Date de mise à l'herbe	Date de début de l'atelier foin	Date de fin de l'atelier foin	Date de rentrée des animaux à l'étable	Récoltes	Ventes	Achats	Distributions de foin au pâturage	Proportion de foin de qualité médiocre	Indicateur synthétique
Stratégie	F	0,23	3041,00	146,09	1,15	18,05	11,04	12,98	1,17	67,17	29,60
	p	0,7991	0,0000	0,0000	0,3310	0,0000	0,0003	0,0001	0,3252	0,0000	0,0000
Interaction stratégie-climat	F	33,40	3041,00	40,72	1,15	1,81	1,73	12,98	26,50	19,06	13,20
	p	0,0000	0,0000	0,0000	0,3310	0,1840	0,1964	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001
Interaction stratégie-diversité du territoire	F	15,21	13,00	4,47	1,63	7,00	18,30	2,58	10,24	7,02	3,87
	p	0,0000	0,0001	0,0215	0,2149	0,0037	0,0000	0,0954	0,0005	0,0037	0,0339
	n	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36

La figure 39 présente, sur les 11 années de la station de Landos et pour une organisation donnée du territoire diversifié, les résultats des trois stratégies de décision. Elle illustre leur variabilité inter-annuelle. Si l'on considère les stratégies 1 et 2, on constate ainsi que les dates de début de l'atelier foin et de rentrée à l'étable sont identiques sur la série présentée. Pour la proportion de foin de qualité médiocre, les ventes, les achats, les récoltes, la date de mise à l'herbe ou les distributions au pâturage, les allures des courbes des stratégies 1 et 2 sont identiques (même si les résultats sont distincts) fluctuant au gré des bonnes ou des mauvaises années. En d'autres termes et si l'on prend l'exemple des récoltes, on voit que les résultats obtenus avec la stratégie 2 sont toujours supérieurs à ceux de la stratégie 1 les bonnes (pic de la courbe) comme les mauvaises années (creux de la courbe). Pour la date de fin de l'atelier foin, les allures des courbes sont différentes.

La figure fait en outre apparaître l'effet des successions d'années. On voit ainsi que parce que l'année 3 est une année où les récoltes sont faibles et les distributions au pâturage importantes, il y a des achats l'année 4 à la fin de l'hiver.



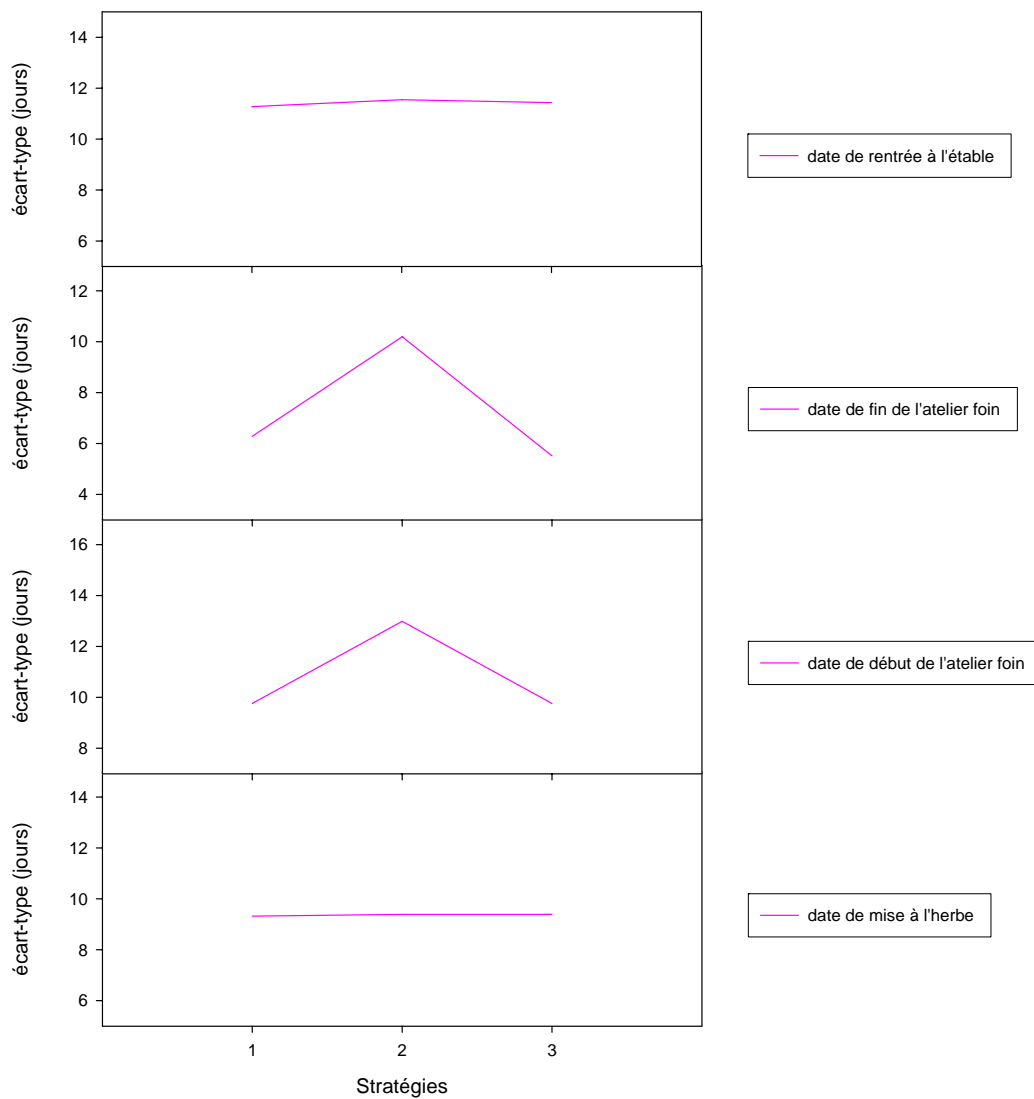
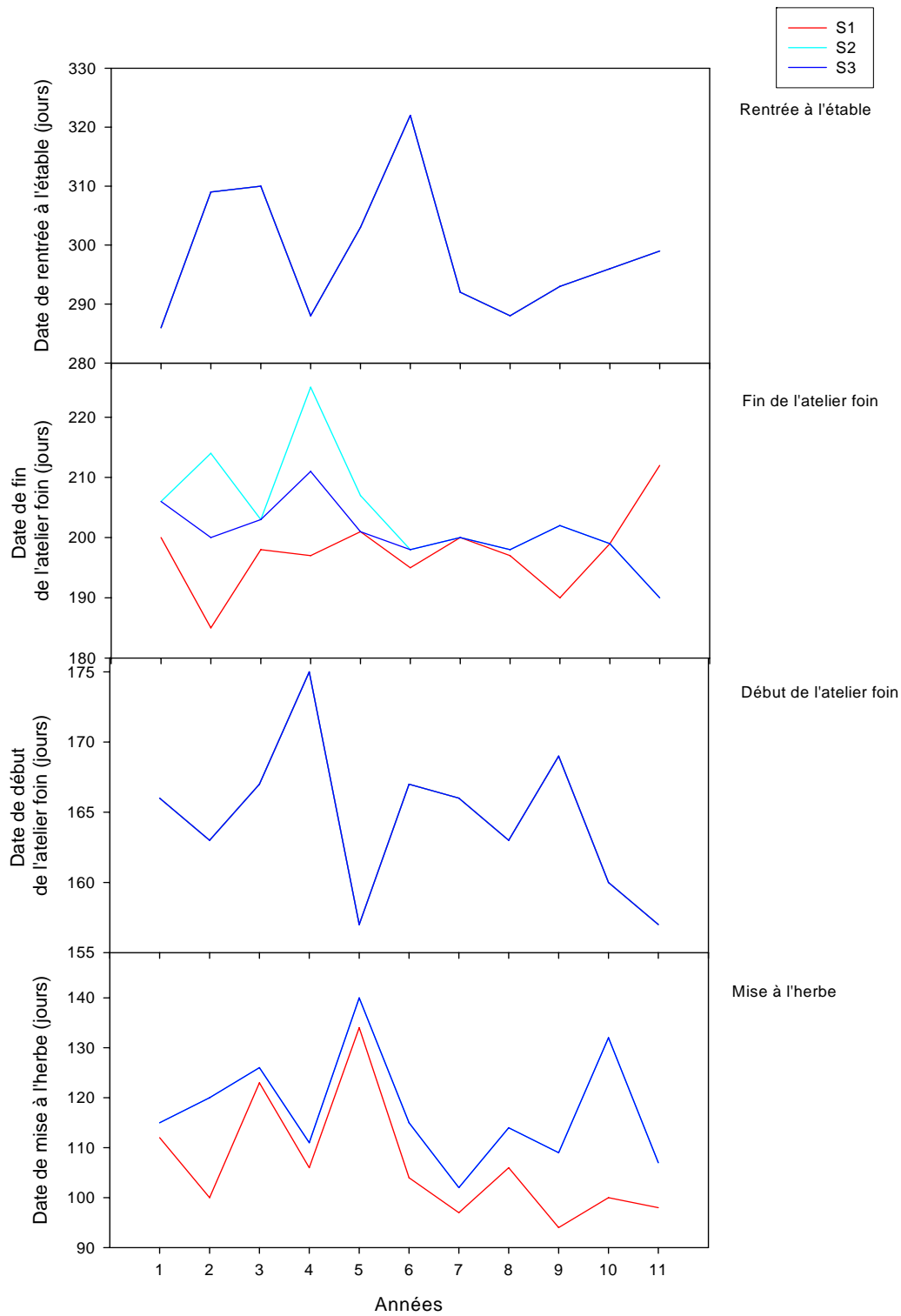


Figure 38 : Ecart-type des différents indicateurs en fonction de la stratégie de décision



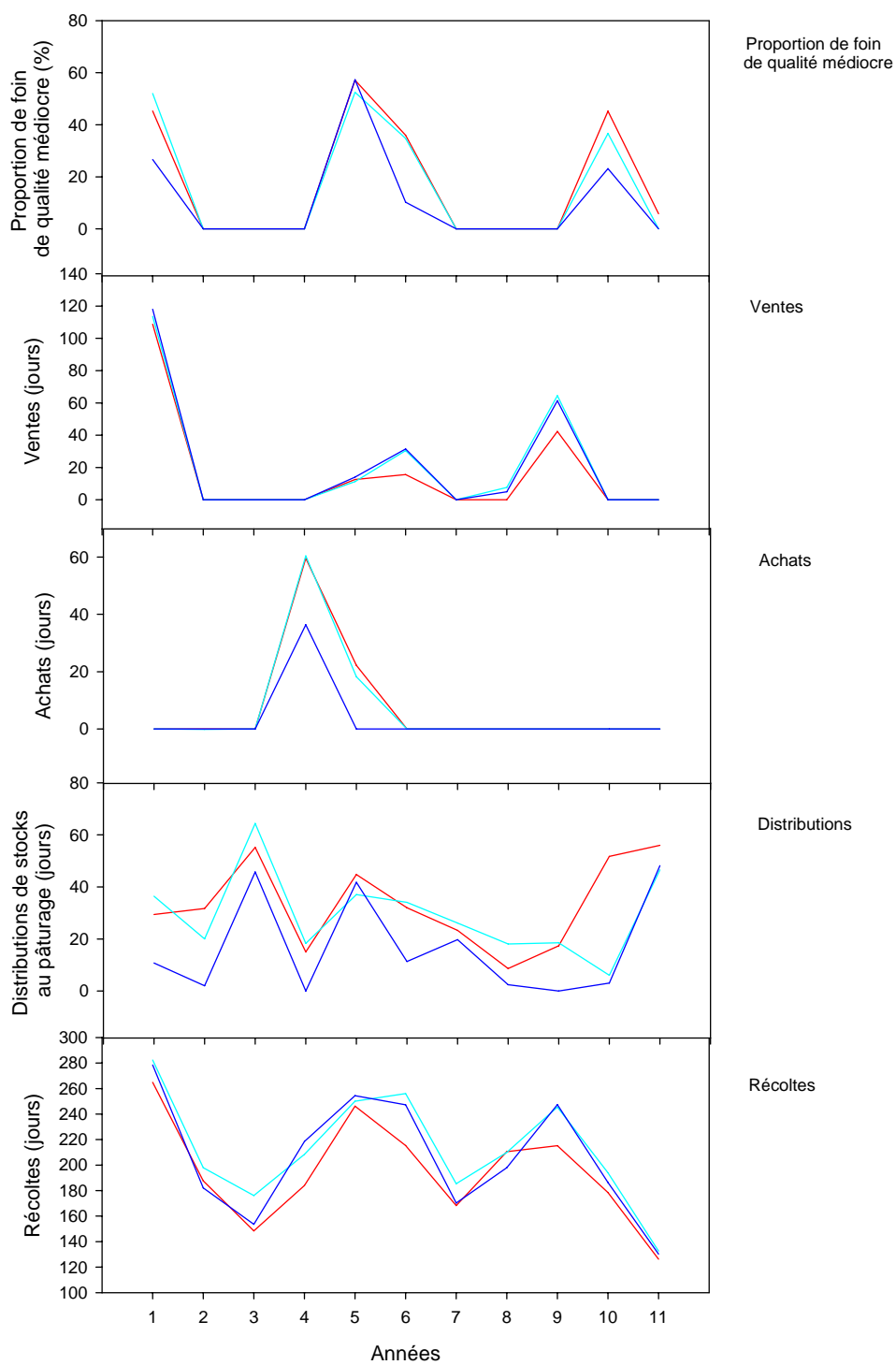


Figure 39 : Variabilité inter-annuelle des différents indicateurs

2.2.1.1 Effet climat

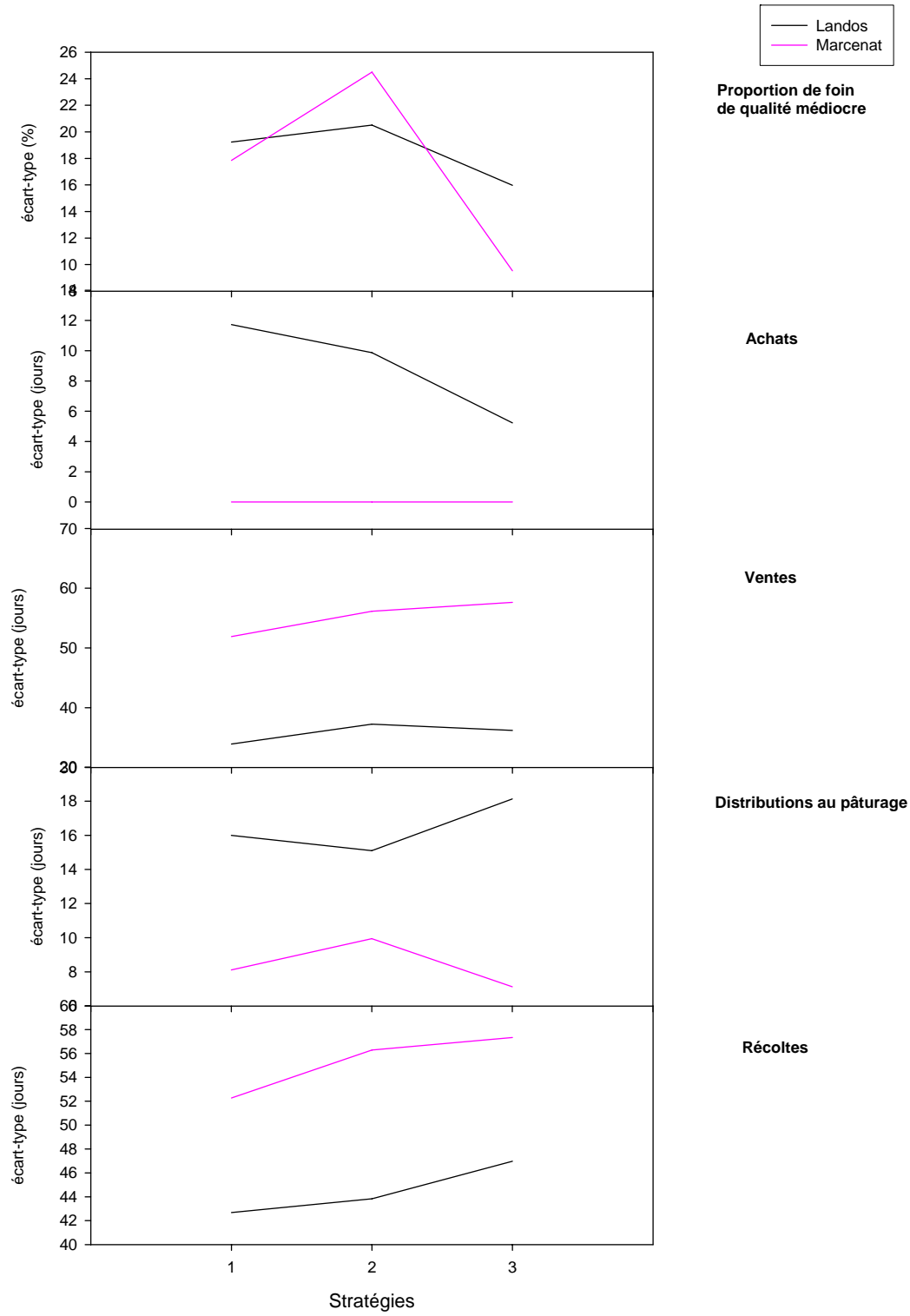
Dans la section précédente nous avons vu que pour les dates de mise à l'herbe et de rentrée à l'étable, la variabilité est identique entre stratégies mais qu'en revanche pour les autres indicateurs (hormis les achats), elle est plus importante avec la stratégie 2 qu'avec la stratégie 1. Nous intéressant à l'interaction stratégie climat (figure 40) on constate que pour les dates de mise à l'herbe ou de rentrée à l'étable, les écart-types restent identiques entre stratégies quelque soit le climat même si on note une légère augmentation (de l'ordre de 0,8 jour) de la variabilité à Marcenat. Pour date de fin de l'atelier foin, l'augmentation de la variabilité induite par la stratégie 2 est plus marquée à Marcenat (6,1 jours) qu'à Landos (1,8 jours). Il en est de même pour les récoltes (4 jours à Marcenat contre 1,14 à Landos), la proportion de foin de qualité médiocre (6,7 % à Marcenat contre 1,3 % à Landos) et les ventes (4,3 jours à Marcenat contre 3,3 à Landos). Pour la date de début de l'atelier foin et l'indicateur synthétique, il n'y a pas de différences entre stratégies à Landos alors que l'écart-type augmente à Marcenat (de 6,5 jours pour la date de début de l'atelier foin, de 4 jours pour l'indicateur synthétique). Pour les distributions de foin au pâturage, la variabilité calculée pour la stratégie 1 est plus faible (de 0,9 jour) que celle de la stratégie 1 à Landos mais supérieure à Marcenat (de 1,8 jours).

On peut donc dire qu'à Landos les différences entre stratégies sont minimales en revanche à Marcenat, la stratégie 2 entraîne une variabilité plus importante que la stratégie 1.

2.2.1.2 Effet territoire d'exploitation

L'augmentation de la variabilité induite par la stratégie 2 par rapport à la stratégie 1 sur les dates de début (3,2 jours) et de fin (3,9 jours) de l'atelier foin ainsi que sur les distributions au pâturage (0,5 jour) est du même ordre pour les territoires peu diversifiés et diversifiés (figure 41).

Pour la proportion de foin de qualité médiocre, l'augmentation de la variabilité est plus marquée avec les territoires peu diversifiés (4,3 jours) qu'avec les territoires diversifiés (3,6 jours).



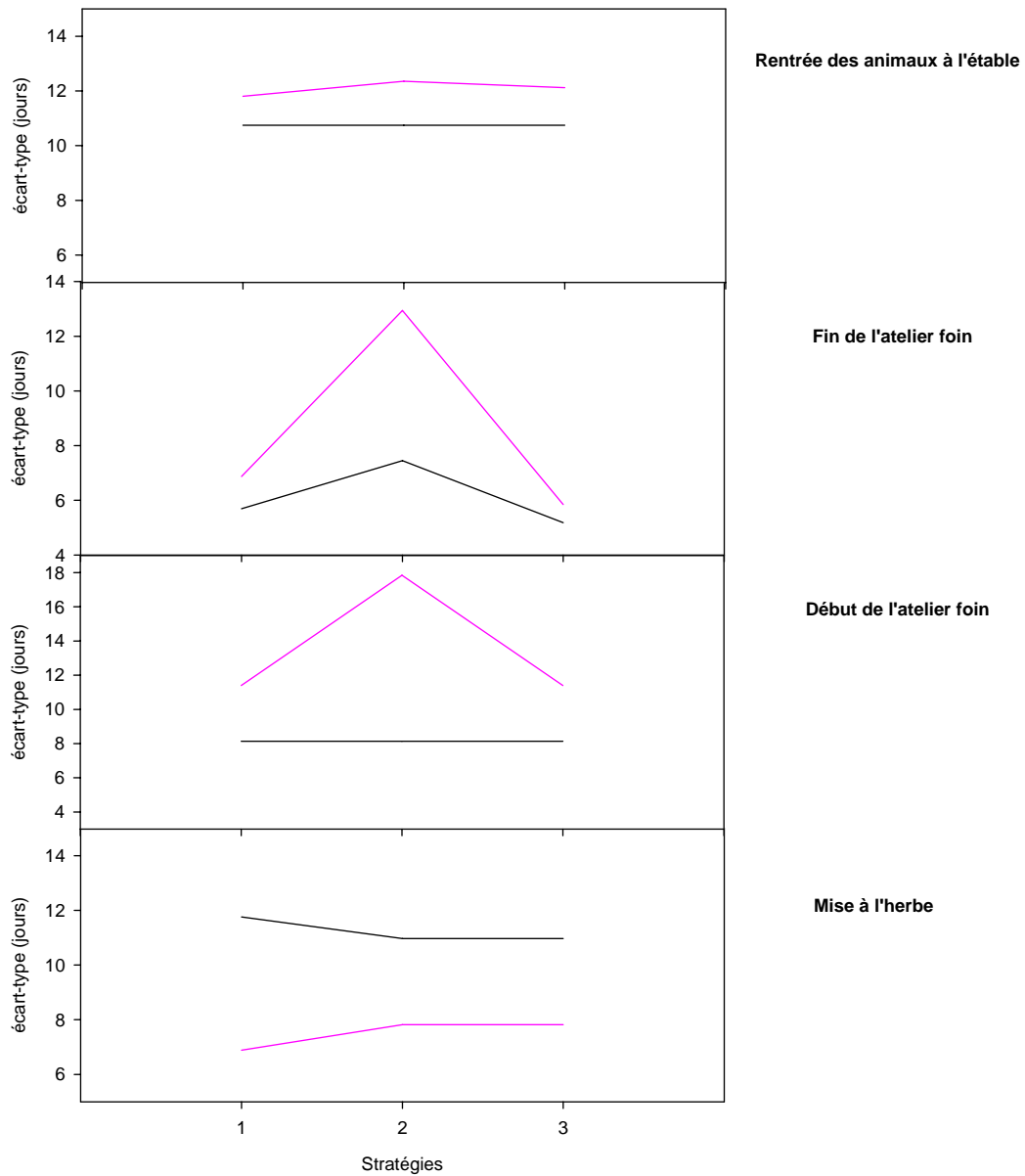
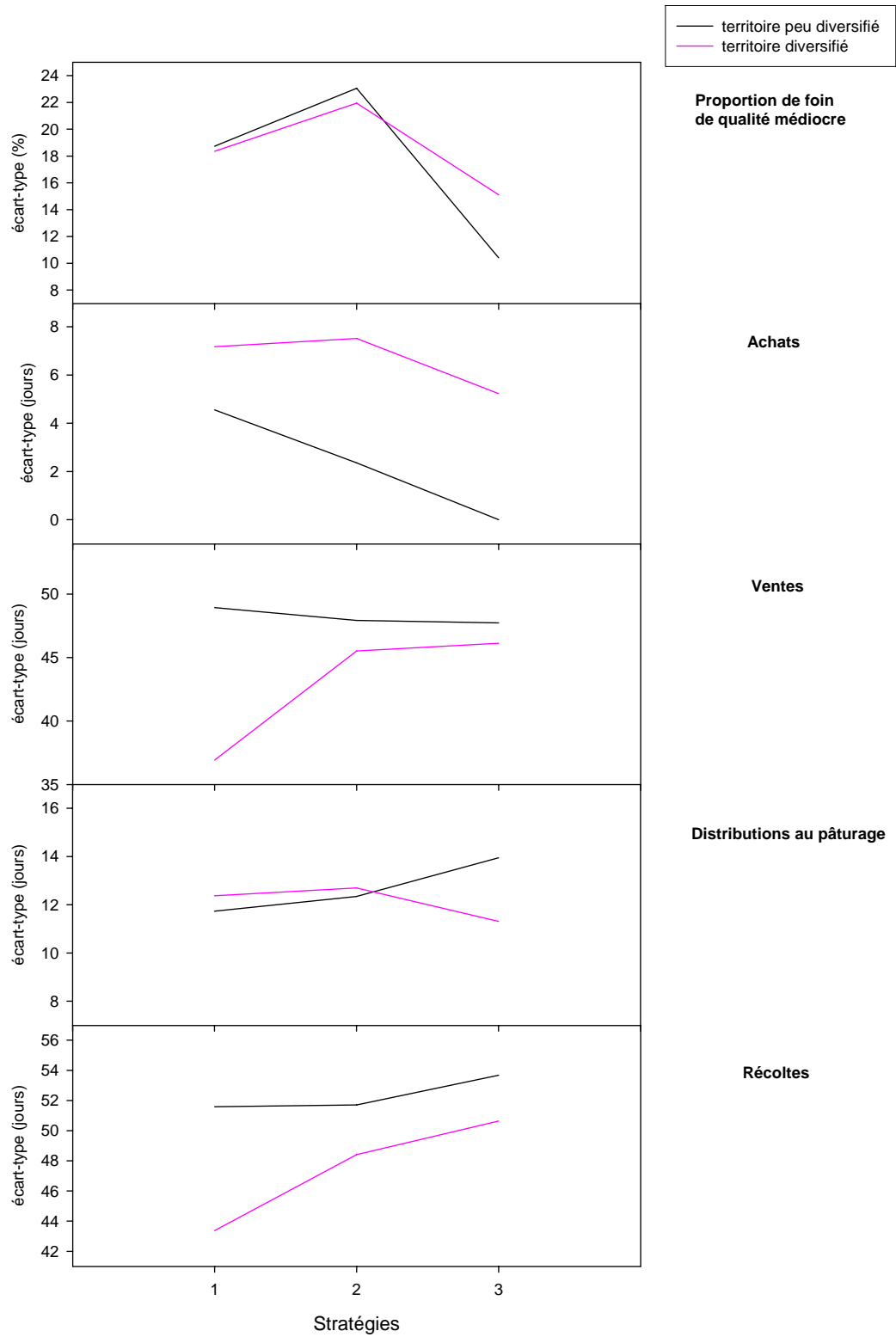


Figure 40 : Ecart-type de l'interaction stratégie-climat



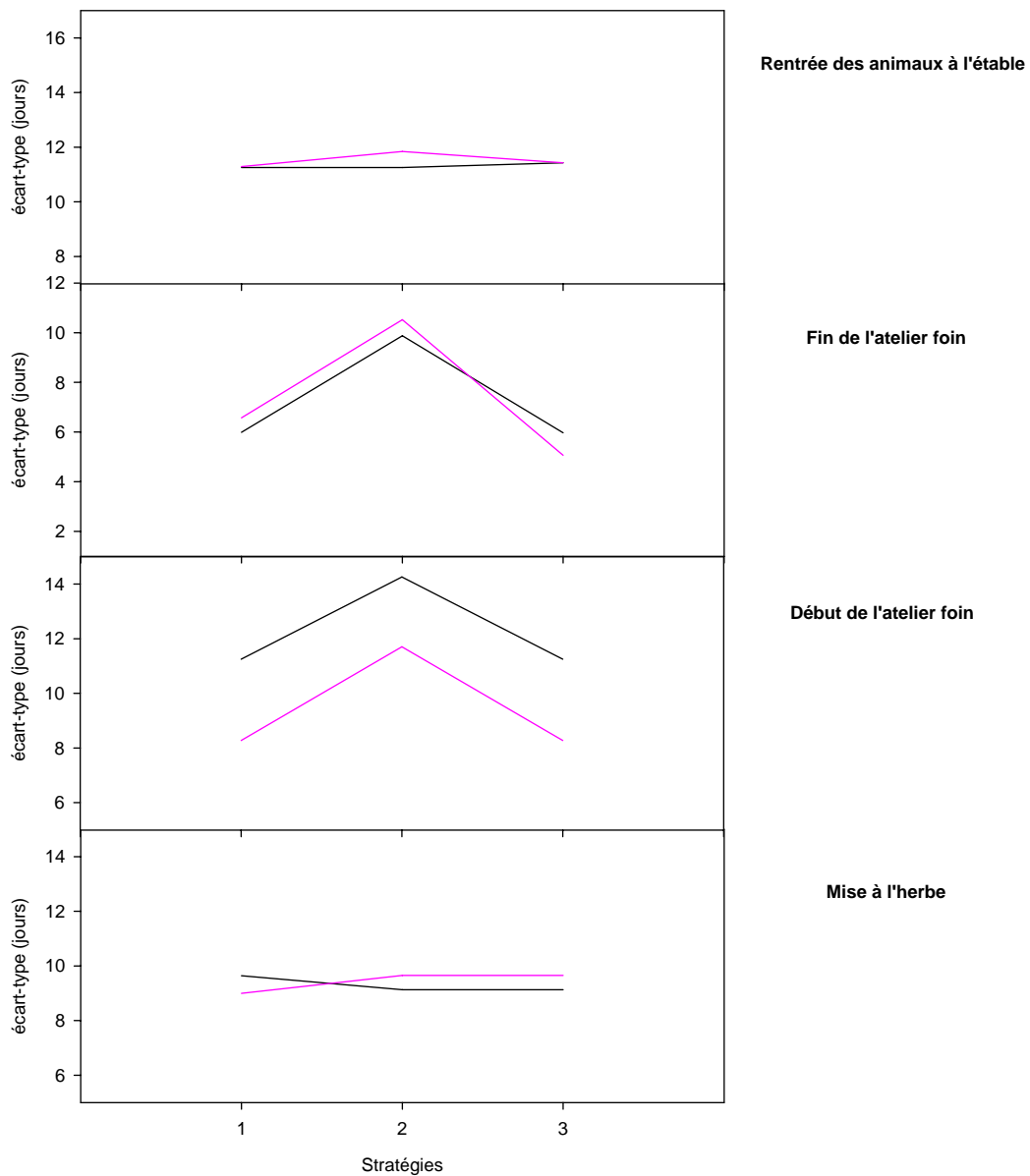


Figure 41 : Ecart-type de l'interaction stratégie-niveau de diversité du territoire

Pour la mise à l'herbe, les ventes, les achats ou l'indicateur synthétique, l'écart-type diminue avec les territoires peu diversifiés et augmente avec les territoires diversifiés. Pour la date de rentrée à l'étable, il n'y a pas de différences entre stratégies avec les territoires peu diversifiés mais une légère augmentation de l'écart-type (0,6 jour) avec les territoires diversifiés. Il en est de même pour les récoltes de fourrages où l'écart-type est quasiment identique entre stratégies avec les territoires peu diversifiés mais augmente de 5 jours avec les territoires diversifiés.

Globalement on peut dire que, hormis pour la proportion de foin de qualité médiocre, la stratégie 2 entraîne une variabilité plus importante que la stratégie 1 et ce quand le territoire est diversifié.

2.2.2 Comparaison des stratégies 3 et 1

Pour la date de mise à l'herbe ou de rentrée à l'étable, les écart-types des stratégies sont quasiment identiques. Il en est de même pour la date de début de l'atelier foin. Pour la date de fin de l'atelier foin, l'écart-type calculé pour la stratégie 3 est légèrement inférieur (de 0,8 jour) à celui de la stratégie 1.

En ce qui concerne les récoltes de fourrages stockés, l'écart-type obtenu avec la stratégie 3 est supérieur de 4,7 jours par rapport à la stratégie 1. Pour les quantités de foin distribuées au pâturage, l'écart-type est supérieur de 0,6 jour. Il est inférieur de 3,3 jours concernant les achats. Pour les ventes, il augmente de 4 jours. En ce qui concerne la proportion de foin de qualité médiocre, l'écart-type diminue de 5,8 %.

Pour un certain nombre d'indicateurs (les dates notamment), la variabilité reste à peu près identique entre stratégies. Elle tend à augmenter en ce qui concerne la récolte de stocks, les distributions au pâturage ou les ventes et à diminuer pour la proportion de foin de qualité médiocre, les achats ou la date de fin de l'atelier foin. Le tableau 37 montre que la variabilité de l'indicateur synthétique augmente avec la stratégie 3.

2.2.2.1 Effet climat

Dans la section précédente nous avons vu que pour les dates la variabilité est quasiment identique entre les stratégies 3 et 1. Pour les achats et la proportion de foin de qualité médiocre, la variabilité est plus faible avec la stratégie 3. En revanche pour les autres indicateurs, la variabilité est plus importante avec la stratégie 3 qu'avec la stratégie 1. En dissociant les résultats des deux séries climatiques pour s'intéresser à l'interaction stratégie climat, on constate que pour les dates, les différences entre stratégies sont peu marquées quel que soit le climat. Pour la proportion de foin de qualité médiocre, la variabilité diminue plus à Marcenat (8,3 %) qu'à Landos (3,3 %). L'augmentation de la variabilité des récoltes et des ventes est légèrement plus marquée à Marcenat qu'à Landos (5,1 jours à Marcenat contre 4,3 à Landos pour les récoltes et 5,7 jours à Marcenat contre 2,3 à Landos pour les ventes). Pour les distributions au pâturage, l'écart-type diminue à Marcenat (1 jour) mais augmente à Landos (2,1 jours). Pour l'indicateur synthétique, l'augmentation de la variabilité est plus marquée à Landos (7,6 jours) qu'à Marcenat (4,1 jours).

L'interaction stratégie-climat est moins marquée que pour les stratégies 2 et 1. On note néanmoins que pour la proportion de foin de qualité médiocre, les récoltes et les ventes, l'influence de la stratégie 3 sur la variabilité est plus marquée à Marcenat qu'à Landos

2.2.2.2 Effet territoire d'exploitation

Pour la proportion de foin de qualité médiocre, la diminution de la variabilité induite par la stratégie 3 est plus marquée avec les territoires peu diversifiés (8,3 %) qu'avec les territoires diversifiés (3,2 %). Il en est de même pour les achats dont la variabilité diminue de 4,7 jours avec les territoires peu diversifiés contre 1,9 jours avec les territoires diversifiés. En revanche, l'augmentation de la variabilité pour les ventes, les récoltes et l'indicateur synthétique est plus marquée avec les territoires diversifiés qu'avec les territoires peu diversifiés.

Pour les distributions au pâturage, l'écart-type diminue avec les territoires diversifiés (1,1 jours) et augmente avec les territoires peu diversifiés (2,2 jours). Pour les dates, les différences sont peu marquées entre stratégies pour les territoires diversifiés comme pour les territoires peu diversifiés. Pour la date de fin de l'atelier foin, on note néanmoins que la stratégie 3 entraîne une diminution de l'écart-type de 1,5 jours avec les territoires diversifiés alors qu'ils sont identiques entre stratégies avec les territoires peu diversifiés. Pour la date de

mise à l'herbe, la variabilité diminue avec les territoires peu diversifiés de 0,5 jour mais augmente avec les territoires diversifiés de 0,7 jour.

D'une façon générale, il est difficile de conclure à une variabilité plus accentuée avec un territoire donné.

2.3 Arbitrage entre réalisme et test d'hypothèse

Dans les premières versions de la stratégie témoin, le modèle n'associait pas les pratiques au type de végétation. Dans la mesure où le modèle ne fait pas évoluer les végétations, cela signifie que les parcelles de type 4 pouvaient être fauchées et celles de type 2 être pâturées. Or, lors du suivi d'exploitations, nous avons constaté que les prairies de types 2 ou 3 sont le plus fréquemment fauchées alors que celles de type 3 et 4 sont pâturées (section 2.3.1.3 du chapitre 4) illustrant le lien entre pratiques et types de végétation.

Dans les premières versions de la stratégie témoin, le fait que ce lien ne soit pas pris en compte entraînait des dates d'élargissement de la surface de pâturage beaucoup plus tardives que dans la réalité. Nous avons donc mis en relation pratiques et types de végétation. Cette modification contribue à plus de réalisme mais a atténué les différences entre stratégies. Ainsi dans sa version antérieure, les récoltes obtenues avec la stratégie 1 étaient inférieures de 29 jours de consommation à celles de la stratégie 3. De même, en ce qui concerne les dates, les différences étaient plus marquées et on constatait pour les territoires peu diversifiés, des dates de premières coupes plus tardives de 13 jours et de 7 jours pour les dates de fin de l'atelier foin. Il a donc fallu faire un arbitrage entre réalisme et test d'hypothèse.

Avec les modèles de recherche utilisés dans un but exploratoire il est possible de « décorrélérer » des relations qui le sont dans la réalité afin de tester de nouvelles alternatives. Dans notre recherche nous avons dé-corrélé un certain nombre de relations. Par exemple, nous avons supprimé le lien observé entre stratégie d'utilisation du territoire et diversité pour disposer d'une stratégie témoin (section 2.4.3 du chapitre 4). Néanmoins, supprimer le lien entre pratiques et types de végétation nous semblait difficilement acceptable puisqu'il ne permettait pas de simuler avec suffisamment de réalisme la dynamique du système fourrager. De plus les résultats obtenus auraient peut-être surestimé les avantages réels des stratégies mettant à profit la diversité du territoire. D'autres raisons militent pour cette prise en considération : les parcelles ayant peu d'herbe (ou des ligneux) engendrent des coûts de

récolte élevés ou ne seraient pas récoltables ; *a contrario*, le pâturage permet de récolter de faibles biomasses sans générer des coûts élevés.

Puisque le modèle ne fait pas évoluer les types de végétation (section 1 du chapitre 6), nous avons associé, via les règles d'affectation, le pâturage ou la récolte de stocks à des types de végétation distincts.

2.4 Validation ou non des hypothèses

La construction du modèle était essentiellement motivée par la nécessité de procéder à une étude pluriannuelle. Le recours à la simulation nous permet donc d'évaluer la variabilité des résultats de production entre années et de définir l'intérêt d'une prise en compte de la diversité du territoire dans les règles de dimensionnement ou d'ordonnement.

La comparaison des stratégies 2 et 1 montre que la prise en compte de la diversité du territoire dans les règles de dimensionnement entraîne une augmentation de la variabilité pour la majorité des indicateurs considérés. Pour les dates de mise à l'herbe et de rentrée à l'étable, la variabilité reste inchangée. En d'autres termes, hormis pour les achats de stocks, elle ne permet pas de limiter la variabilité du système fourrager aux aléas climatiques.

La comparaison des stratégies 3 et 1 montre que la prise en compte de la diversité du territoire dans les règles de dimensionnement et d'ordonnement tend à diminuer la variabilité des résultats de production si l'on considère les achats et la proportion de foin de qualité médiocre. Elle reste inchangée pour les dates. Elle augmente pour les récoltes, les ventes, les distributions de foin au pâturage et l'indicateur synthétique. Hormis pour 2 indicateurs sur 10, la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques n'est pas réduite.

Dans cette recherche nous avons fait plusieurs simplifications (dans les processus observés et modélisés mais aussi dans les indicateurs retenus pour évaluer les scénarios). Compte tenu de ces simplifications on peut donc dire que l'hypothèse générale selon laquelle la diversité du territoire permet de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques, n'est pas vérifiée. Si l'on considère les récoltes ou l'indicateur synthétique, elle a même tendance à augmenter. Pour la stratégie 3 et l'indicateur « récoltes », la figure 37 illustre l'augmentation de la variabilité. Elle montre que la stratégie 3 permet en moyenne une récolte supérieure de

11 jours par rapport à la stratégie 1, mais certaines années, cette récolte est supérieure de 30 jours. On peut donc dire que la diversité du territoire permet de tirer partie des circonstances climatiques favorables à la pousse de l'herbe et à sa récolte.

La prise en compte de la diversité du territoire a des répercussions sur les résultats de production moyens. Cela permet de tirer deux types de conclusions.

1) La prise en compte de la diversité modifie de façon effective les résultats de production qu'il s'agisse des dates ou des stocks. Pour les stocks la tendance est à une augmentation des récoltes. Lorsque cette prise en compte concerne également l'ordonnancement, elle induit une diminution des distributions au pâturage et une diminution de la proportion de foin de qualité médiocre. Pour les dates, la mise à l'herbe est plus tardive. Ces résultats montrent que la façon dont l'éleveur met à profit la diversité du territoire peut avoir des répercussions sur les dates de mises à l'herbe, la qualité et les quantités de stocks récoltées, achetées ou vendues. Le fait d'affecter les parcelles les plus précoces aux ateliers de production de fourrages stockés a eu des répercussions positives sur les quantités récoltées, en revanche cela a contribué à retarder la mise à l'herbe.

2) Nos conclusions sont dépendantes du critère retenu pour évaluer la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Ce critère d'évaluation est l'écart-type. Coléno et Duru (1998) ou Landais et Balent (1995) montrent que dans les systèmes d'élevage extensifs l'éleveur fixe des seuils à atteindre ou ne pas dépasser. Le type d'indicateur pertinent est alors la fréquence d'avoir des résultats inférieurs ou non à des seuils donnés. Pour les différents indicateurs, il est possible de définir un seuil et d'évaluer la fréquence d'occurrence d'un événement supérieur ou non à ce seuil. Pour les récoltes par exemple, il est possible d'évaluer le nombre d'années où la récolte a été déficitaire nécessitant des achats ; de même pour la qualité. La stratégie ayant la fréquence la plus importante d'achats ou encore de foin de qualité médiocre est alors jugée plus sensible. Nous n'avons réalisé nos simulations que sur 11 années. Ce nombre d'années est insuffisant pour pouvoir utiliser cet indicateur. Cependant, compte tenu de l'influence moyenne des stratégies sur ces résultats, on peut penser que si nous avions eu une série d'années plus longue, nous aurions pu nuancer la réponse à l'hypothèse et conclure que la prise en compte de la diversité permet de limiter la sensibilité aux aléas climatiques.

Pour chacune des stations climatiques, certaines années sont plus ou moins favorables à la pousse de l'herbe (figures 26 et 27). Les décisions de l'éleveur sont elles aussi activées en fonction du climat. Il en résulte qu'une année favorable à la pousse de l'herbe peut se traduire

par des résultats de production moindres qu'une année jugée moins favorable. Par exemple une somme des températures importante favorise la pousse de l'herbe, mais parce que le stade déclenchant la fauche est atteint plus rapidement, la récolte est précoce. Les quantités de stocks récoltées sont alors plus faibles que si les conditions avaient été plus défavorables (par exemple une somme des températures inférieure et peu de séquences sans pluie). Les années où les résultats de production sont bons (par exemple récoltes importantes) correspondent donc à des types d'années différents engendrant des combinaisons spécifiques d'effets directs (séquence sans pluie et températures) ou indirects (stade et production de biomasse) du climat sur la prise de décision.

Les bonnes années, c'est à dire les années non pas favorables à la pousse de l'herbe mais aux décisions entraînant des résultats de production favorables sont illustrées par la figure 39. Pour plusieurs indicateurs les allures des courbes des différentes stratégies sont identiques (section 2.2.1). Cela provient du fait que les règles de planification (qui décident de la nature des parcelles affectées à l'atelier ou de leur surface) sont indépendantes des années, l'effet stratégie décrit précédemment est donc observé les bonnes comme les mauvaises années. Si l'on considère les récoltes, nous avons vu que les stratégies 2 et 3 affectent les parcelles les plus productives aux ateliers de production de fourrages stockés. Avec la figure 39 on voit intuitivement que pour limiter la variabilité des récoltes, il faudrait ne pas affecter les parcelles les plus productives aux ateliers de production de fourrages stockés les bonnes années. Seulement, l'éleveur ne dispose pas de prévision à l'échelle de la campagne ni même à l'échelle saisonnière lui permettant de savoir à l'avance le type d'années. Seule la prise en compte des événements écoulés peut permettre de limiter la variabilité des résultats de production en considérant par exemple les reports de stocks entre années.

L'augmentation des récoltes de fourrages stockés et la diminution des distributions au pâturage permises par la prise en compte de la diversité dans les règles de dimensionnement et d'ordonnancement entraînent des surplus importants. Ces surplus ou reports de stocks produits l'année n peuvent partiellement être réutilisés l'année $n+1$. Nous avons limité la capacité de stockage à 3,5 tonnes par UGB. Dans le modèle, le besoin moyen du troupeau pour l'hiver est estimé à 2,7 tonnes par UGB. Le report possible est alors de 0,8 tonne par UGB soit 53 jours d'alimentation. Produire des surplus importants, même s'ils sont redistribués l'année d'après pour garantir l'alimentation du troupeau en cas de production insuffisante, ne permet pas de limiter la sensibilité aux aléas climatiques au sens où nous l'avons définie. Ceci est particulièrement vrai lorsque ces surplus sont variables entre années. Il apparaît que seule la prise en compte de ces surplus dans la planification permettrait de

limiter la variabilité des résultats de production. En d'autres termes, cela signifie une meilleure prise en compte des coordinations inter-annuelles via une planification variable.

Deux options sont possibles pour cette planification :

- adapter la surface affectée aux différents ateliers en fonction des reports de stocks ;
- adapter la prise en compte de la diversité en fonction des reports de stocks.

En cas de reports de stocks importants (produits l'année n), le premier cas de figure signifie que l'année $n+1$ la surface affectée à la production de fourrage récoltée pourrait être réduite. Dans le second cas de figure, la surface affectée aux ateliers pourrait rester inchangée mais la nature des parcelles (et plus précisément leur niveau de production) varier. Ainsi les parcelles les moins productives pourraient être affectées l'année $n + 1$ à la production de fourrages stockées.

Les figures 26 et 27 montrent qu'à un printemps défavorable à la pousse de l'herbe peut succéder un été favorable. Les coordinations concernent donc également l'échelle intra-annuelle. Dans le modèle, les coordinations intra-annuelles sont prises en compte par l'intermédiaire des surfaces tampons ou par la possibilité de distribuer durant l'été le foin récolté au printemps, si la production de l'herbe au pâturage est insuffisante. Cependant, la planification des parcelles affectées aux différents ateliers ne prend pas en compte le déroulement antérieur de la campagne. Tout comme pour l'échelle inter-annuelle on peut imaginer d'adapter la surface affectée aux différents ateliers en fonction des résultats de la saison précédente ou adapter la prise en compte de la diversité. Ainsi, dans le deuxième cas de figure, en cas de printemps sec ne permettant pas de récolter suffisamment de stocks pour l'hiver, il faut limiter les distributions de foin au pâturage. Affecter les parcelles les plus productives au pâturage permet alors de limiter les quantités de foin distribuées durant l'été. Nous avons fait le choix de considérer une stratégie stable dans le temps et de rendre possible les ajustements seulement via les surfaces tampons prédéfinies (section 5 du chapitre 6). Ce choix a permis de caractériser les mécanismes, la deuxième étape consisterait à prendre en compte ces coordinations intra et inter-annuelles.

Lorsque l'on réalise les simulations à partir de la série climatique de Marcenat ou avec un territoire diversifié, l'effet stratégie est accentué (notamment lorsque l'on compare les stratégies 1 et 2). Les coordinations inter-annuelles présentent donc un enjeu plus important lorsque le niveau de diversité du territoire augmente et pour des séries climatiques favorables à la production fourragère.

Les résultats des simulations mettent donc en évidence l'intérêt d'une mise à profit de la diversité mais soulignent l'importance des règles de coordination pour limiter la variabilité inter-annuelle des résultats de production.

Conclusion

Pour différents territoires d'exploitation et séries climatiques, nous avons pu comparer les stratégies 2 et 3 à la stratégie témoin. Cette comparaison a permis de caractériser l'influence de la prise en compte de la diversité du territoire dans les règles de dimensionnement et d'ordonnancement sur la variabilité inter-annuelle des résultats de production. La caractérisation de cette variabilité a permis de tester nos hypothèses de travail et de montrer que cette prise en compte de la diversité ne permettait pas de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Pour autant cette conclusion ne remet pas en cause l'intérêt d'une mise à profit de la diversité du territoire. D'une part cette mise à profit permet en moyenne une augmentation des récoltes, une diminution des distributions de foin au pâturage, des achats ou de la proportion de foin de qualité médiocre ce qui constitue autant de résultats favorables pour l'autonomie du système fourrager. D'autre part nos conclusions sont dépendantes du critère retenu pour mesurer la variabilité. Les critères statistiques permettant de chiffrer la variabilité de valeurs observées ou simulées autour d'un paramètre de position sont des critères de dispersion tels que l'écart-type (Dagnelie, 1985). La fréquence n'est pas un critère de dispersion. Mais en caractérisant l'occurrence de résultats supérieurs ou non à un seuil, elle permet une description de cette variabilité conforme avec la vision de l'éleveur. En effet, celui-ci détermine des seuils de production à atteindre ou ne pas dépasser. Si nous avons réalisé les simulations avec un nombre d'années plus important, ce critère aurait ainsi permis de déterminer si la prise en compte de la diversité du territoire permet ou non de dépasser des seuils critiques pour le fonctionnement du système fourrager.

Conclusion de la troisième partie

A l'issue de cette troisième partie, qui présente les deux dernières étapes de notre démarche de travail, deux résultats doivent être soulignés.

1) Un modèle original a été construit.

Notre modèle simule l'utilisation de parcelles hétérogènes durant une campagne fourragère, depuis la mise à l'herbe des animaux à leur rentrée à l'étable. L'hiver, ces animaux consomment les stocks produits pendant la campagne. Pour rendre compte de l'utilisation des parcelles, le modèle comporte deux propriétés. La première est qu'il est capable de simuler les conséquences de la diversité du territoire sur la production fourragère, sa précocité et son accessibilité. La deuxième est qu'il simule différentes stratégies de prise en compte de cette diversité. Ces stratégies permettent une planification de l'utilisation des parcelles avant la campagne et leur utilisation effective durant celle-ci compte tenu des aléas climatiques. Les processus modélisés sont simplifiés, néanmoins la validation auprès d'experts a montré son caractère réaliste et sa capacité à reproduire la dynamique du système fourrager compte tenu des simplifications réalisées.

2) Une réponse aux hypothèses de travail a été apportée.

Le modèle était au cœur de notre démarche d'évaluation des hypothèses. Celles-ci nécessitaient en effet une échelle d'étude pluri-annuelle qu'autorisent les modèles de simulation. Même si les hypothèses ont été infirmées, nous avons pu éclairer le mécanisme par lequel la diversité du territoire peut être mise à profit par l'éleveur. Nous avons alors pu explorer une fonction de la diversité du territoire peu caractérisée jusqu'à présent et proposer des pistes permettant d'approfondir notre recherche.

Conclusions générales

Dans notre recherche, nous souhaitons caractériser la possibilité de mettre à profit la diversité du territoire pour limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Dans cette étude, la modélisation a occupé une place centrale.

Le modèle construit est un modèle de recherche puisque l'objectif n'était pas de fournir une aide à la décision destinée aux éleveurs (Cox, 1996) mais d'améliorer la connaissance du système fourrager. Ce modèle associe une composante biophysique et une composante décisionnelle. La première permet de simuler la production d'herbe en fonction de la diversité du territoire et des aléas climatiques. La deuxième simule différentes stratégies d'utilisation du territoire durant la campagne fourragère en tenant compte dans la prise de décision des aléas climatiques et de la diversité du territoire de l'exploitation.

Le concept d'ateliers de production proposé par Coléno (1997) a été structurant tout au long de notre recherche. Ce concept a fourni un cadre d'analyse des règles de décisions aboutissant à l'utilisation du territoire. Compte tenu de ce cadre d'analyse, le dimensionnement et l'ordonnement d'ateliers sont les deux composantes de l'utilisation du territoire. Ce concept a ainsi permis :

- de décliner l'hypothèse centrale en hypothèses spécifiques à tester ;
- de fournir une grille de lecture des règles de décision des éleveurs lors de la phase empirique préalable à la modélisation ;
- de fournir un support à l'élaboration du sous-modèle décisionnel.

La construction du modèle a nécessité une étude empirique. Cette étude a reposé sur des pré-enquêtes auprès de 21 éleveurs ainsi qu'un suivi auprès d'un noyau plus restreint de 7 éleveurs. Nous n'avons pas cherché à constituer un échantillon représentatif de la gamme des systèmes d'élevage d'herbivores existants en Auvergne. Nous avons plutôt établi un échantillon de taille réduite afin de pouvoir étudier de manière approfondie les pratiques des agriculteurs et pouvoir reconstituer leurs stratégies d'utilisation du territoire. L'objectif était de disposer d'une connaissance de terrain, constituant une base de départ à partir de laquelle on pourrait élaborer des règles de décision virtuelles pour tester nos hypothèses. Cette phase empirique a permis de définir trois stratégies d'utilisation à modéliser. Ces stratégies correspondent à des niveaux croissants de prise en compte de la diversité dans les règles de dimensionnement et d'ordonnement. L'étude empirique a également permis de déterminer la structure du modèle grâce à l'identification des éléments les plus déterminants à prendre en considération et ceux pouvant faire l'objet d'une simplification.

La simulation des stratégies sur plusieurs années et la caractérisation de la variabilité des résultats de production ont permis de tester les hypothèses et de répondre à la question de

départ. Compte tenu des indicateurs retenus pour caractériser la variabilité des résultats de production nous avons conclu que la prise en compte de la diversité du territoire ne permettait pas de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Au contraire, une prise en compte fine tend à augmenter cette variabilité.

A l'issue de cette recherche, plusieurs points doivent être discutés. Dans un premier temps, nous reviendrons sur l'objet de cette étude afin de le situer au sein de la bibliographie existante et de montrer son originalité. Nous reviendrons également sur l'hypothèse générale testée. Pour conduire cette recherche nous avons procédé à un certain nombre de restrictions. Ainsi, en focalisant sur l'objet d'étude, nous avons mis de côté les autres possibilités permettant de réduire la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques, simplifié la composante animale et n'avons pas tenu compte des autres déterminants de l'utilisation du territoire. Nous discuterons de la pertinence de ces restrictions et tâcherons de voir en quoi elles limitent la portée du travail. Nous analyserons enfin les pistes permettant d'approfondir cette recherche.

1 Originalité du travail

1.1 Recherche d'une nouvelle piste pour limiter la sensibilité aux aléas climatiques

Dès 1981, Mathieu et Raphalen signalaient la nécessité de caractériser la variabilité des résultats de production fourragère plutôt que de raisonner à travers une année moyenne dans les travaux portant sur la prévision du système fourrager. Le recours croissant à la modélisation et le développement des modèles capables de simuler les relations plantes-climat ont permis de mieux appréhender la variabilité du climat sur les résultats de production. Beaucoup de travaux ont ainsi cherché à simuler les réponses du système fourrager aux aléas climatiques. Peu d'entre eux visaient spécifiquement à limiter la variabilité inter-annuelle des résultats de production soit par différents niveaux de recours aux intrants ou différentes utilisations du territoire. Au sein des travaux cherchant à limiter la sensibilité aux aléas climatiques via l'utilisation du territoire, on ne trouve pas de référence pour la mise à profit de la diversité du territoire. L'accent est mis sur les pratiques et non sur l'interaction entre pratiques et diversité du territoire. Par exemple, Hengsdijk et van Ittersum (2003) cherchent à limiter la variabilité de la production de millet via les pratiques en testant différentes dates de

semis. Romera *et al.* (2004) cherchent à limiter la variabilité de la production d'exploitations d'élevage en Argentine grâce à différentes stratégies d'utilisation de stocks fourragers.

Dans notre recherche, nous avons considéré que la diversité du territoire pouvait être un atout pour permettre de limiter la sensibilité aux aléas climatiques. Plusieurs auteurs considérant la diversité de la flore suggèrent qu'elle participe aux processus de régulation du système fourrager (Duru *et al.*, 1998 ; Landais et Balent, 1995 ; Altieri, 1999 ; White *et al.*, 2004). Altieri considère le rôle de cette diversité sur la régulation de la population de ravageurs, la fertilité du sol ou la santé des plantes cultivées. White *et al.* (2004) font eux quelque peu référence au lien entre diversité des sols et du climat et espèces fonctionnellement diversifiées. Duru *et al.* (1998) font plus explicitement référence à un rôle tampon de la diversité des végétations face aux aléas climatiques. C'est ce dernier aspect que nous avons cherché à explorer dans notre recherche. Nous avons alors posé comme hypothèse à tester que la diversité du territoire permettait de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques. Cette hypothèse est contraire à certains travaux pour lesquels la diversité est une contrainte dans la gestion du système fourrager (Gibon *et al.*, 1989). Nous avons donc souhaité proposer des pistes de réflexion pour permettre de mieux valoriser la diversité du territoire d'exploitation au sein du système fourrager.

1.2 Les modèles du système fourrager ne simulent pas la diversité du territoire

Pour mener cette étude centrée sur la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques, le recours à la modélisation était nécessaire. En effet l'objet d'étude implique une échelle d'étude pluriannuelle. Les modèles permettent de simuler les effets de variables sur le long terme et de disposer très rapidement de résultats, ce qui serait long et coûteux via l'expérimentation ou le suivi. Dans cette étude l'expérimentation se fait entièrement par modélisation. Plusieurs recherches ont eu recours à ce type d'expérimentation par simulation. Dans ces recherches l'objet d'étude évolue sur plusieurs années. On peut citer les travaux étudiant l'impact des pratiques agricoles sur l'évolution du paysage (Depigny, 2003) ou l'évolution de systèmes agro-sylvo-pastoraux (Bergez *et al.*, 1999) où la croissance arbustive nécessite une échelle d'étude de plusieurs décades. Dans ce type d'études, même si une phase empirique permet de valider ou construire le modèle, l'essentiel repose sur l'interprétation des

simulations. Pour le même type de raison, nous avons donc été amenés à construire un modèle du système fourrager. La phase de pré-enquêtes auprès de 21 éleveurs puis de suivi de campagne auprès de 7 éleveurs a contribué à son réalisme.

Les modèles capables de rendre compte de la conduite du système fourrager sont nombreux (Cacho *et al.*, 1995 ; Coléno, 1997 ; Kristensen *et al.*, 1997 ; Cros *et al.*, 2001 ; Romera *et al.*, 2004). En fonction de leurs objets d'étude certains sont focalisés sur la composante végétale, d'autres sur la composante animale. Ces modèles diffèrent également par leurs utilisations (recherche ou aide à la décision) ou leurs techniques de modélisation. Nous avons préféré construire notre propre modèle du système fourrager, tout en adaptant un modèle de croissance de l'herbe existant. Ce choix ne signifie pas la non pertinence des modèles existants mais plutôt leur caractère inadapté à notre objet d'étude (Sinclair et Seligman, 2000).

Au sein des nombreux modèles existants, la diversité du territoire de l'exploitation est faiblement modélisée. Qu'il s'agisse des modèles appliqués aux grandes cultures ou aux exploitations d'élevage, les surfaces modélisées sont le plus souvent homogènes. Batchelor *et al.*, 2002 proposent plusieurs méthodes pour rendre compte de la diversité au sein d'une parcelle de 20 hectares. L'une de ces méthodes consiste à subdiviser la parcelle en sous unités homogènes et à mener une simulation pour chacune d'entre elles en changeant par exemple la réserve en eau du sol, la conductivité hydraulique, la profondeur d'enracinement. Pour avoir le rendement global, les résultats obtenus pour chaque sous-unité sont agrégés. Une deuxième méthode consiste à utiliser un modèle hydrologique tridimensionnel capable de simuler le ruissellement en fonction de la topographie. Ces méthodes permettent de simuler les conséquences de la variabilité du territoire sur le rendement d'une culture et ainsi proposer des règles de conduite (variété, fertilisation, irrigation) adaptées. Cependant, elles ne permettent pas de rendre compte des stratégies d'utilisation du territoire mises en œuvre par les éleveurs. Baumont *et al.* (2002) proposent un modèle à l'échelle de la parcelle qui simule la diversité intra-parcellaire de végétation. Armstrong *et al.* (1997) simulent la diversité des végétations (arbustes, prairies naturelles et temporaire) sur une estive. Dans le cadre des systèmes fourragers, cette échelle intra-parcellaire est pertinente lorsqu'on étudie les processus de sélection alimentaire de l'animal mais inadaptée pour l'étude des stratégies de gestion de l'éleveur qui s'appliquent à l'échelle de la parcelle. Dans les rares modèles simulant la diversité inter-parcellaire, la source de diversité est limitée. La diversité inter-

parcellaire résulte chez Gibon *et al.* (1989) de classes de fertilité et de la surface. Le modèle construit par Thornton et Jones (1998) prend en compte le type de sol, la pente ainsi que la distance au marché. APSIM est un modèle simulant avec beaucoup de modularité et de façon très détaillée la production végétale ainsi que les processus biophysiques se déroulant dans le sol. Dans la dernière version du modèle soit 10 ans après la première version du modèle en 1991, la possibilité de simuler la diversité du territoire a été intégrée. Cette fonctionnalité n'est pas encore tout à fait au point (Keating *et al.* 2003) mais illustre la nécessité de disposer d'outils capables de simuler la diversité du territoire d'exploitation.

La principale originalité du modèle que nous avons construit est sa capacité à rendre compte de la diversité du territoire et des modalités d'utilisation de cette diversité par l'éleveur grâce au sous-modèle décisionnel. En effet, le modèle simule la diversité inter-parcellaire de végétation, altitude, réserve en eau du sol, exposition. La distance et le caractère fauchable de la parcelle sont également pris en compte. Avec ce modèle, il est aussi possible de simuler un éleveur virtuel prenant en compte l'état du système et les conditions environnementales (climat et diversité du territoire) pour décider des actions à entreprendre (déplacement des animaux, rentrée à l'étable, fauche,...).

Ce modèle a nécessité le couplage d'un sous système décisionnel à un sous système biophysique. Dans la plupart des travaux, le sous-système décisionnel se rapporte à des opérations techniques à des dates prédéfinies ou éventuellement activées par les aléas climatiques. Le but est alors d'évaluer les conséquences des opérations techniques sur la ressource animale ou herbagère. Seuls quelques travaux ont cherché à formaliser le système décisionnel (Gibon *et al.*, 1989 ; Cros *et al.*, 2001 ; Chatelin *et al.*, 2004). Gibon *et al.* structurent le processus de décision en trois niveaux d'organisation. Le premier à l'échelle de la parcelle permet la mise en œuvre de l'opération technique. Les deux autres à l'échelle du groupe de parcelles gèrent d'une part : les compétitions entre parcelles et entre opérations techniques, d'autre part le choix des modes d'exploitation parcellaire à appliquer. Cros *et al.* (2001) structurent le sous système décisionnel de manière réaliste par rapport aux pratiques de l'éleveur et aux représentations des conseillers ayant en charge l'appui technique au pâturage. Le modèle proposé par Chatelin *et al.* (2004) pour la culture du blé présente également une tentative de structuration du processus décisionnel avec une planification de la production guidant les actions conduites au jour le jour en fonction des données climatiques. Structurer ainsi le processus décisionnel permet de rendre compte de l'anticipation des événements opérée par l'éleveur (Aubry *et al.*, 1998 ; Murray-Prior, 1998) et de mettre en évidence les

ajustements qu'il met en oeuvre. Dans notre modèle décisionnel cette anticipation conduit à dimensionner des surfaces tampons également déterminées par la structure du territoire.

2 L'hypothèse de départ infirmée

Dans cette recherche, l'hypothèse de départ selon laquelle la diversité du territoire permet de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques a été infirmée. Cependant la réponse que nous avons apportée est contingente de toutes les simplifications réalisées. Nous avons souligné à plusieurs reprises que cette recherche implique une échelle d'étude pluri-annuelle. L'absence de modèle permettant de simuler la diversité du territoire et sa prise en compte dans les règles de décision signifie par la même occasion l'absence de données comparatives. Il est alors difficile de pouvoir confronter nos conclusions avec la bibliographie existante. En menant cette étude, nous avons exploré une voie peu décrite auparavant.

Dans cette recherche, nous avons montré que la prise en compte de la diversité du territoire permettait d'augmenter les quantités de stocks produites, et vendues, de limiter les distributions de foin au pâturage, les achats ainsi que la proportion de foin de qualité médiocre. Ces résultats peuvent être qualifiés de favorables si l'on raisonne en termes d'autonomie fourragère. Nous avons souligné l'intérêt de disposer d'un nombre d'années plus important afin d'évaluer les résultats selon la fréquence d'avoir des résultats supérieurs ou non à un seuil donné. Nous avons également souligné la nécessité d'améliorer la modélisation des coordinations inter-annuelles. Coléno *et al.* (2002) montre que la prise en compte des reports de stocks et des ruptures alimentaires intervenues durant l'année précédente dans le dimensionnement des surfaces permet d'augmenter la part du pâturage dans l'alimentation du troupeau et « procure au système fourrager une flexibilité plus forte vis-à-vis de l'aléa climatique ». Nous revenons sur ces aspects dans la section 4.

3 Les restrictions réalisées

Pour mener cette recherche, nous avons procédé à un certain nombre de restrictions. La définition de l'objet d'étude a été le premier et probablement le plus crucial niveau de simplification. De cette simplification a découlé la lecture de la phase empirique et une partie des simplifications du modèle construit. Hormis les simplifications imposées au départ, un

certain nombre d'arbitrages supplémentaires ont été réalisés lors de la construction du modèle. La méthode de validation du modèle qui a suivi, a aussi nécessité un arbitrage entre validation à dire d'experts ou validation fonctionnelle. Nous discutons de l'ensemble de ces choix.

3.1 Les restrictions de l'objet d'étude

Dans le cas de l'élevage des herbivores, Landais et Balent (1995) distinguent trois types de pratiques mises en œuvre par les éleveurs :

- les pratiques d'élevage au sens strict, à travers lesquelles ils interviennent directement sur les animaux ;
- les pratiques fourragères, qui regroupent toutes les opérations culturales effectuées sur les surfaces fourragères ;
- les pratiques de gestion du pâturage et des stocks fourragers qui mettent en relation les troupeaux et les sous-unités de surface.

Nous intéressant à la manière dont l'utilisation d'un territoire diversifié permet de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques, nous avons donc plutôt étudié la troisième catégorie de pratiques définie par Landais et Balent. En d'autres termes, les aléas climatiques étant susceptibles de perturber la mise en relation entre troupeaux et sous unités de surface, nous cherchions à explorer le rôle de la diversité du territoire dans les pratiques de gestion du pâturage et des stocks fourragers pour maintenir l'équilibre. Compte tenu de la grille de lecture proposée par Coléno (1997), cela revient à se focaliser sur les ateliers fourragers (les ateliers de production de stocks conservés et les différents ateliers de pâturage) et à considérer qu'ils cherchent à répondre à une demande imposée par les ateliers animaux.

Les autres déterminants de l'utilisation du territoire (travail, gestion environnementale...) n'ont pas fait partie de cet objet d'étude.

Pour faire face aux aléas climatiques et mettre en relation troupeaux et sous-unités de surface, l'éleveur planifie et pilote des régulations portant sur parcelles ayant des caractéristiques hétérogènes. Les autres possibilités permettant de limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques n'ont pas été explorées. La possibilité d'ajuster les apports de concentrés ou de fertilisants n'a donc pas été considérée. Ce choix est cohérent avec celui de ne pas étudier les pratiques d'élevage ou les pratiques fourragères si l'on se réfère à la classification proposée par Landais et Balent.

En résumé, seuls étaient donc pris en compte les modes de planification et de pilotage des affectations de parcelles aux différents ateliers fourragers. L'ensemble de ces choix a conditionné l'analyse de la phase empirique. Le questionnaire et les entretiens étaient largement orientés sur les pratiques d'affectation des différentes parcelles aux ateliers fourragers. L'analyse des dates, des surfaces, de l'ordre d'affectation des parcelles planifiés et pilotés était au cœur de cette étude empirique.

Les questions posées aux éleveurs, puisqu'elles cherchaient à éclairer les déterminants de ces pratiques, pouvaient mettre en évidence des contraintes de main d'œuvre ou de matériel et donc faire resurgir les autres déterminants de l'utilisation du territoire. Cela signifie que quand bien même le type d'information recueilli était orienté par les choix effectués, lorsque certains déterminants prévalaient, ils pouvaient être perçus lors des entretiens avec les éleveurs. Cependant il est évident qu'en faisant ces choix nous n'avons pas exploré toute la complexité des décisions de l'éleveur. Parce que nous ne cherchions pas à hiérarchiser l'ensemble des possibilités pour limiter la sensibilité aux aléas climatiques ou à modéliser le processus de décision dans toute sa complexité, ce choix de focaliser uniquement sur l'objet d'étude paraît acceptable même si il a conduit à une perte d'informations.

3.2 Les restrictions du modèle

Une définition communément admise des modèles est qu'ils sont une représentation simplifiée de la réalité. Cette définition implique que la construction d'un modèle nécessite d'opérer des choix.

Les simplifications que nous avons réalisées dans la phase de construction du modèle étaient liées :

- aux simplifications de l'objet d'étude présentées dans la section précédente ;
- à l'insuffisance des connaissances ;
- au souhait de limiter le niveau de complexité du modèle.

Certaines des simplifications réalisées étaient le reflet des simplifications plus générales de l'objet d'étude. Ainsi, conformément au choix de se focaliser sur les ateliers fourragers, la composante animale dans le modèle est réduite à une ingestion quotidienne qui ne varie pas dans le temps. Les autres déterminants de l'utilisation du territoire (travail, équipement) ne sont que faiblement pris en compte à travers un seuil limitant la surface fauchable par jour. La

possibilité de limiter la sensibilité aux aléas climatiques via le recours aux concentrés ou à la fertilisation n'est pas modélisée.

En plus de ces simplifications, d'autres étaient liées à l'insuffisance de nos connaissances actuelles. Ainsi le suivi a montré que les pratiques d'utilisation du territoire étaient fortement à l'origine de la diversité constatée des types de végétation. Le modèle n'est pas capable de faire évoluer ces types en fonction des pratiques simulées. Cependant quand bien même il aurait été possible de faire évoluer ces types, il aurait été difficile d'interpréter les résultats et de savoir si un résultat donné est la conséquence de cette évolution, ou des stratégies. Une limite de nos connaissances plus contraignante est le fait que le modèle ne simule pas les conséquences du rayonnement sur la précocité de la parcelle, pour celles présentant des expositions nord ou sud. En effet, nous avons seulement été capables de simuler les conséquences de l'exposition sur la production de biomasse à partir des travaux de Legros *et al.* (1997). Or le suivi a montré que si les éleveurs prenaient en compte l'exposition dans leurs pratiques c'était pour ces deux aspects. Les différences entre les stratégies que nous avons testées s'en trouvent donc atténuées.

Certaines des simplifications n'étaient ni contraintes par le champ des connaissances ou encore les restrictions de l'objet d'étude mais tout simplement par la nécessité de ne pas construire un modèle trop complexe. Ainsi, le nombre de caractéristiques permettant de décrire la diversité du territoire d'exploitation (et aussi pris en compte dans les décisions de l'éleveur) a été limité. Les différences de surface entre parcelles n'ont pas été prises en compte. Rajouter cette caractéristique est techniquement très simple mais complexifie les règles de décision censées la prendre en compte. De même les différents lots d'animaux n'ont pas été simulés. Le suivi permet de faire ces choix en hiérarchisant les facteurs les plus importants. Par exemple il a montré que la surface est un facteur moins déterminant que la distance dans les décisions d'affectation de surfaces. Il a aussi montré que les lots d'animaux en croissance ou à l'entretien valorisent souvent des parcelles éloignées. Cette dernière catégorie de simplifications est finalement la plus douloureuse puisque le modélisateur choisit délibérément de ne pas prendre en compte certaines composantes de la réalité sans que des contraintes particulières pèsent sur ce choix (hormis celle de choisir un niveau de complexité adéquat pour le modèle). Hakanson (1995) s'est interrogé sur le niveau de détail optimal des modèles prédictifs. Il démontre mathématiquement que lorsqu'on augmente le nombre de paramètres on améliore la description du système. En revanche, on augmente également l'imprécision du modèle et donc sa capacité prédictive. Augmenter la complexité du modèle

signifie en outre renseigner un nombre plus grand de paramètres et rend moins souple son utilisation. De plus, comme nous l'avons signalé, il apparaît difficile de faire le tri entre l'effet des différents paramètres lors de l'interprétation des sorties. Selon Woodward et Rollo (2002), les meilleures prédictions peuvent être obtenues en utilisant des modèles relativement simples nécessitant un nombre limité de variables explicatives et facilement accessibles.

Le choix de ne focaliser que sur l'objet d'étude apparaît comme un choix judicieux. Cependant lors de l'analyse des résultats on ne doit pas perdre de vue l'ensemble de ces simplifications.

3.3 Une validation partielle

La validation d'un système complexe est selon Brown et Kulasiri (1996) l'une des tâches les plus difficiles lors du processus de développement d'un modèle. Balandier *et al.* (2003) préfèrent le terme d'évaluation à celui de validation compte tenu du caractère controversé du concept (section 2 du chapitre 5). Certains auteurs soulignent l'impossibilité d'une validation ce qui milite pour une non validation des modèles. D'autres prônent une batterie de tests statistiques pour cette validation (Kleijnen et Sargent, 2000). Entre ces deux extrêmes, nous avons choisi de mener une validation à dire d'experts. Elle consiste à demander à des personnes ayant une bonne connaissance du système, si le comportement du modèle leur paraît réaliste. Parmi les auteurs ayant procédé à ce type de validation, les procédures sont rarement explicitées. Nous avons fait le choix de présenter aux experts réunis dans une pièce des sorties du modèle sous des formes avec lesquelles ils sont familiers (tableaux, graphiques et calendrier fourrager). Deux objections principales peuvent être formulées. La première est que nous avons présenté aux experts des résultats de simulation sans recueillir préalablement leurs représentations ou attentes quant aux sorties simulées. Ainsi, comme cela aurait pu être le cas si nous avions disposé de données de terrain indépendantes, il s'agirait de comparer les sorties du modèle avec ces représentations (la représentation étant censée refléter la réalité). Nous aurions alors pu établir un seuil précis de rejet de l'hypothèse de validité du modèle. Cette démarche est tout de même à prendre avec précautions pour les validations à dire d'experts où entre en jeu la subjectivité de l'expert. La deuxième objection est que les experts n'étaient pas isolés. Par conséquent, le discours collectif recueilli est probablement différent du discours individuel. Cependant, la dynamique de groupe est malgré tout intéressante, elle

favorise le débat et l'interaction entre les experts grâce auxquels peut émerger une représentation commune.

La validation doit déterminer si le modèle est une représentation valable du système cohérente avec l'utilisation souhaitée (Kleijnen et Sargent, 2000). Les éléments de réponse apportés par le modèle à notre hypothèse de départ participent en quelque sorte à cette validation.

4 Perspectives

Il est possible d'améliorer le diagnostic sur l'intérêt des différentes stratégies d'utilisation du territoire en détaillant mieux certains processus et composants modélisés du système fourrager. Cela signifie en d'autres termes que l'approfondissement de l'étude passe par l'amélioration de l'outil construit. Il passe aussi par un nombre plus important de données climatiques.

4.1 Les données climatiques

Les données utilisées pour les simulations sont des données réelles. Le nombre d'années utilisées a été essentiellement déterminé par la disponibilité de l'ensemble des données requises. Le coût des données constitue un second facteur limitant du nombre d'années utilisé. Les générateurs de climat permettent de pallier ces limites mais d'une part ils tendent à sous-estimer la variabilité inter-annuelle du climat (Hansen et Mavromatis, 2001) d'autre part dans les générateurs passés en revue, l'ETP n'est pas calculée. Une série de 11 années semblaient un bon compromis entre la capture de la variabilité climatique et la minimisation des données à interpréter (rappelons que le modèle fournit pour chacun des 36 scénarios testés des résultats journaliers). A posteriori nous nous sommes rendus compte que le nombre d'années simulées était insuffisant pour tirer des conclusions pertinentes en termes de fréquence. Dans les systèmes d'élevage extensifs les éleveurs fixent des seuils de production à atteindre ou ne pas dépasser (Landais et Balent, 1995 ; Coléno et Duru, 1998). La fréquence aurait donc été un indicateur cohérent pour évaluer la variabilité des systèmes fourragers aux aléas climatiques. Au lieu de l'écart-type indicateur plus conventionnel de la variabilité, la fréquence aurait permis de juger de la variabilité des résultats de production en termes plus concrets pour la

prise de décision. Par exemple, on aurait jugé du nombre d'années où une stratégie donnée conduit à des productions inférieures aux besoins des animaux.

Reste donc à résoudre le problème de l'acquisition des données climatiques. Balandier *et al.*, 2003 montrent comment il est possible de générer des séries d'une centaine d'années à l'aide simplement de quelques années de référence. On pourrait ainsi s'inspirer de leur méthode pour disposer d'une trentaine d'années. Ils définissent des types d'années selon à peu près la même approche que celle que nous avons utilisée pour caractériser les années climatiques utilisées pour nos simulations. A partir d'une série d'années, Balandier *et al.* (2003) caractérisent pour chaque année le nombre de « jours actifs » (jours où la température, les précipitations et l'ETP sont favorables) pour la croissance de l'herbe. Ils ordonnent ensuite les années en fonction de ce nombre de jours actifs et différencient des types d'années (par exemple « mauvaise », « moyenne », « bonne » année pour la production). Ils calculent la fréquence d'occurrence de chaque type d'année. Ils sélectionnent au sein de chaque type, une année donnée. Les années sélectionnées sont multipliées en fonction de leur fréquence d'occurrence. On voit ainsi comment passer de 11 à une trentaine d'années. Nous aurions pu également choisir de construire des séries plus irréalistes composées d'une suite d'années défavorables ou inversement d'une suite d'années favorables (une combinaison des deux types d'années auraient également pu être envisagée). Elles auraient permis de mieux décrire le lien entre les résultats de production et le type d'année mais surtout d'explorer les coordinations inter-annuelles dans le cadre d'une planification tenant compte des reports de stocks.

4.2 Amélioration de l'outil

Nous avons souligné plusieurs restrictions opérées pour notre recherche. Certaines de ces restrictions pourraient être levées. Le modèle pourrait être complexifié afin de prendre en compte ces aspects non explorés sans perdre de vue les enseignements de Hakanson (1995) sur le lien entre l'augmentation du nombre de paramètres et l'augmentation de l'incertitude. Lors de la construction du modèle nous avons choisi une analyse par objet. Cette analyse confère une grande lisibilité au modèle liée à la similitude entre les objets et les entités ou processus que l'on peut identifier dans la réalité. Elle confère également un caractère évolutif au modèle (Bergez *et al.*, 1999). En effet, chaque classe d'objet peut être indépendamment

modifiée sans nécessaire re-programmation des autres classes d'objet. Grâce à cette propriété de l'analyse orientée objet nous pouvons imaginer de complexifier deux modules :

- animal ;
- décisionnel.

4.2.1 Le module animal

Pour le module animal nous avons imposé deux restrictions majeures : un seul lot d'animaux, une ingestion constante au cours du temps. La première restriction nous paraît largement acceptable. Il est vrai que la présence d'autres lots d'animaux (celui des vaches taries en particulier) permet des ajustements tels que le pâturage des refus du lot de vaches laitières. Mais d'une manière générale, les différents lots d'animaux utilisent des parcelles bien spécifiques. Il semble plus pertinent d'améliorer la description du lot déjà modélisé. Trois voies peuvent être explorées : faire évoluer cette ingestion au cours du temps, améliorer la modélisation des processus conditionnant l'ingestion animale, simuler la production animale.

On pourrait faire varier l'ingestion au cours du temps. Cette amélioration de l'outil est la plus simple à mettre en œuvre. Elle permet de rendre compte des fluctuations de la demande au cours de la campagne en relation avec les pics de production laitière et de tester de façon plus réaliste l'offre fourragère permise par les stratégies.

Dans notre modèle, l'animal n'est représenté qu'à travers une ingestion fixe de matière sèche. Les stratégies concourent à la production d'une certaine quantité de matière sèche. L'équilibre entre ateliers animaux et fourragers résulte de cet échange de matière sèche. Même si il est fait référence à la qualité du fourrage produit par l'intermédiaire de trois classes, cette qualité n'est pas prise en compte dans l'ingestion animale. Or cette qualité conditionne l'ingestion de biomasse. En fonction de cette qualité, il peut ainsi y avoir un déséquilibre entre ateliers animaux et fourragers. Améliorer la modélisation de l'ingestion animale peut donc contribuer à améliorer l'évaluation des stratégies de décision. Il est ainsi possible de simuler les conséquences d'une stratégie d'utilisation du territoire sur l'ingestion animale.

Finlayson *et al.* (1995) ou encore Cros *et al.* (2003) simulent de façon précise l'ingestion animale en fonction de la capacité du rumen, la vitesse de décomposition de l'alimentation, la digestibilité du fourrage, la demande énergétique pour l'entretien et les processus reproductifs.

L'ingestion conditionne le niveau de performance animale. L'amélioration de la modélisation de l'ingestion peut permettre de modéliser la production animale. Dans la mesure où cette production constitue une finalité pour l'éleveur, caractériser la variabilité de la production laitière par exemple permettrait de juger plus finement des stratégies d'utilisation du territoire.

4.2.2 Les règles de décision

Les règles de décision mobilisaient de façon plutôt simple la diversité du territoire. Ainsi, dans les stratégies mettant à profit la diversité du territoire, les parcelles les plus productives étaient toutes affectées aux ateliers de production de fourrages stockés ce qui conduisait à des dates de mise à l'herbe tardives et à des ventes de fourrages conservés importantes. On pourrait imaginer des modalités plus complexes de prise en compte de la diversité du territoire. Avec des modalités plus complexes, il serait possible de réduire les quantités de stocks vendues et d'assurer une mise à l'herbe plus précoce en n'affectant pas l'ensemble des parcelles productives aux ateliers de production de fourrages stockés. Ceci permettrait d'accorder une plus grande place à l'alimentation des animaux au pâturage.

Nous avons également souligné la nécessité d'améliorer la modélisation des coordinations intra et inter-annuelles en adaptant la nature des parcelles affectées aux différents ateliers en fonction du déroulement de la campagne ou des reports de stocks de l'année précédente. Par exemple, si malgré l'affectation des parcelles les plus productives aux ateliers de production de fourrages stockés les récoltes sont insuffisantes au printemps, modéliser les coordinations intra-annuelles permettrait d'affecter les parcelles les plus productives au pâturage d'été afin de diminuer les quantités de foin distribuées au pâturage.

Des entretiens avec les éleveurs pourraient permettre de préciser la structure de ces règles. Ces entretiens seraient aussi l'occasion de valider ces propositions et de déterminer dans quelle mesure de telles coordinations peuvent être mises en œuvre et sont compatibles avec les contraintes de travail.

Toutes les pistes proposées pour améliorer le modèle construit permettront de mieux explorer l'intérêt pour l'éleveur de mettre à profit la diversité de son territoire d'exploitation. Nous avons tâché d'être le plus clair possible sur les limites du modèle et plus largement de notre recherche. Mais au-delà des réserves émises nous avons montré que la diversité du territoire d'exploitation est un atout à exploiter. Nous avons défini cette diversité comme une

caractéristique importante des systèmes d'élevage extensifs. A travers cette recherche nous avons souhaité participer à la meilleure caractérisation de cet objet de recherche émergent.

Bibliographie

- Acutis, M., G. Ducco, and C. Grignani. 2000. Stochastic use of the LEACHN model to forecast nitrate leaching in different maize cropping systems. *European Journal of Agronomy* 13:191-206.
- Altieri, M.A. 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture Ecosystems & Environment* 74:19-31.
- Amir, I., and F.M. Fisher. 2000. Response of near-optimal agricultural production to water policies. *Agricultural Systems* 64:115-130.
- Armstrong, H., I. Gordon, S. Grant, N. Hutchings, J. Milne, and A. Sibbald. 1997. A model of the grazing of hill vegetation by sheep in the UK. I. The prediction of vegetation biomass. *Journal of Applied Ecology* 34:166-185.
- Attonaty, J.M., and L.G. Soler. 1992. Aide à la décision et gestion stratégique: un modèle pour l'entreprise agricole. *Revue Française de Gestion* mars-avril-mai:45-54.
- Aubry, C., F. Papy, and A. Capillon. 1998. Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems* 56:45-65.
- Balandier, P., J.E. Bergez, and M. Etienne. 2003. Use of the management-oriented silvopastoral model ALWAYS: calibration and evaluation. *Agroforestry systems* 57:159-171.
- Batchelor, W.D., B. Basso, and J.O. Paz. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *European Journal of Agronomy* 18:141-158.
- Baumont R., B. Dumont, P. Carrère, L. Pérochon, and C. Mazel. 2002. Design of a multi-agent model of a herd of ruminants grazing a perennial grassland: the animal sub-model, p. 236-237, *In* J. L. Durand, et al., eds. *Multi-function grasslands; quality forages, animal products and landscapes*, Vol. 7. EGF, La Rochelle.
- Bellon, S., N. Girard, and G. Guérin. 1999. Caractériser les saisons pratiques pour comprendre l'organisation d'une campagne de pâturage. *Fourrages* 158:115-132.
- Bergez, J.E., M. Etienne, and P. Balandier. 1999. ALWAYS: a plot-based silvopastoral system model. *Ecological modelling* 115:1-17.
- Bernhard, N. 2002. Analyse spatiale du parcellaire et de ses contraintes dans les systèmes d'élevage laitier de montagne. Mémoire de fin d'étude. ENITA, Clermont-Ferrand.
- Blanchet, A., and A. Gotman. 2001. L'enquête et ses méthodes : l'entretien Nathan Université.
- Bonneviale, J.R., R. Jussiau, and E. Marshall. 1989. L'approche globale de l'exploitation : comment la définir ?, p. 57-71 *Approche globale de l'exploitation agricole*. INRAP, Dijon.
- Boote, K.J., J.W. Jones, and N.B. Pickering. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy journal* 88:704-716.

- Brown, T.N., and D. Kulusari. 1996. Validating models of complex, stochastic, biological systems. *Ecological Modelling* 86:129-134.
- Bywater, A.C., and O.J. Cacho. 1994. Use of simulation models in research. *Proceedings of the New Zealand society of animal production* 54:403-412.
- Cacho, O.J., J.D. Finlayson, and A.C. Bywater. 1995. A simulation model of grazing sheep: II. Whole farm model. *Agricultural Systems* 48:27-50.
- Cacho, O.J., A.C. Bywater, and J.L. Dillon. 1999. Assessment of production risk in grazing models. *Agricultural Systems* 60:87-98.
- Calvière, I., and M. Duru. 1999. The effect of N and P fertilizer application and botanical composition on the leaf/stem ratio patterns in spring in Pyrenean meadows. *Grass and Forage Science* 54:255-266.
- Carbonel et Margat, 1996, *Dictionnaire français d'hydrologie*, Comité national français des sciences hydrologiques
- Carrère, P., C. Force, J.F. Soussana, F. Louault, and R. Baumont. 2002. Design of a spatial model of a perennial grassland grazed by a herd of ruminants: the vegetation sub-model, p. 282-283, *In* J. L. Durand, et al., eds. *Multi-function grasslands; quality forages, animal products and landscapes*, Vol. 7. EGF, La Rochelle.
- Chalvet, V. 2002. Etude des conséquences au niveau des territoires, de l'évolution éventuelle des cahiers des charges des AOC Cantal et Saint Nectaire. ENITA-CEMAGREF, Clermont-Ferrand.
- Chambre d'agriculture d'Auvergne. 2001. Repères sur la filière lait en Auvergne.
- Charpentreau, J.L., and M. Duru. 1983. Simulation of some strategies to reduce the effect of climatic variability on farming system. The case of Pyrenees mountains. *Agricultural Systems* 11:105-125.
- Chatelin, M.H., C. Aubry, P. Leroy, F. Papy, and J.C. Poussin. 1993. Pilotage de la production et aide à la décision stratégique. *Cahiers d'économie et sociologie rurales* 28:119-138.
- Chatelin, M.H., C. Aubry, J.C. Poussin, J.M. Meynard, J. Massé, N. Verjux, P. Gate, and X. Le Bris. 2004. DéciBlé, a software package for wheat crop management simulation. *Agricultural Systems*.
- Coléno, F.C. 1997. Stratégies de gestion des systèmes fourragers en élevage laitiers : Etude empirique et modélisation, Institut Agronomique Paris-Grignon.
- Coléno, F.C., and M. Duru. 1998. Gestion de production en systèmes d'élevage utilisateurs d'herbe : une approche par atelier. *Etudes et recherches sur les systèmes agraires et le développement* 31:45-61.
- Coléno, F.C., and M. Duru. 1999. A model to find and test decision rules for turnout date and grazing area allocation for a dairy cow system in spring. *Agricultural Systems* 61:151-164.

- Coléno, F.C., M. Duru, and L.-G. Soler. 2002. A simulation model of a dairy forage system to evaluate feeding management strategies with spring rotational grazing. *Grass and Forage Science* 57:312-321.
- Coquillard, P., and D.R.C. Hill. 1997. Modélisation et simulation d'écosystèmes, des modèles déterministes aux simulations à événements discrets MASSON.
- Cournut, S. 2001. Le fonctionnement des systèmes biologiques pilotés : simulation à événements discrets d'un troupeau ovin conduit en trois agnelages en deux ans, Lyon 1.
- Cox, P.G. 1996. Some issues in the design of agricultural decision support systems. *Agricultural Systems* 52:355-381.
- Cros, M.J., M. Duru, and D. Peyre. 2001. SEPATOU : un simulateur de conduites du pâturage, à l'épreuve des "menus" bretons. *Fourrages* 167:365-383.
- Cros, M.J., M. Duru, F. Garcia, and R. Martin-Clouaire. 2003. A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. *Agronomie* 23:105-122.
- Cros, M.J., M. Duru, F. Garcia, and R. Martin-Clouaire. 2004. Simulating management strategies: the rotational grazing example. *Agricultural Systems* 80:23-42.
- Cruz, P., M. Duru, O. Therond, J.P. Theau, C. Ducourtieux, C. Jouany, R. Al Haj Khaled, and P. Ansquer. 2002. Une nouvelle approche pour caractériser les prairies naturelles et leur valeur d'usage. *Fourrages* 172:335-354.
- Culos, X., S. Lardon, P.L. Osty, and P. Triboulet. 1996. Modèle de représentation de l'organisation spatio-temporelle des activités d'élevage. Calendriers de pâturage d'ovins sur le Causse Méjan (Lozère), p. 293-300, In C. Christophe, et al., eds. *Etude des phénomènes spatiaux en agriculture*. Inra.
- Dagnelie, P. 1985. *Théorie et méthodes statistiques : applications agronomiques*. 2^{ème} ed. Les presses agronomiques de Gembloux, A.S.B.L.
- de Jager, J.M., A.B. Potgieter, and W.J. van den Berg. 1998. Framework for forecasting the extent and severity of drought in maize in the free state province of South Africa. *Agricultural Systems* 57:351-365.
- de Montard, F.X., and J. Blanchon. 1985. La prairie permanente, base fourragère modelée par la gestion de l'exploitant. *Bulletin technique d'information* 399-401:375-381.
- De Singly, F. 1992. *L'enquête et ses méthodes : le questionnaire* Nathan Université.
- Dedieu, B., G. Chabanet, E. Josien, and F. Bécherel. 1997. Organisation du pâturage et situations contraignantes en travail : démarche d'étude et exemples en élevage bovin viande. *Fourrages* 149:21-36.
- Delaby, L., J.L. Peyraud, and P. Faverdin. 2001. Pâtur'IN : le pâturage des vaches laitières assisté par ordinateur. *Fourrages* 167:385-398.
- Depigny, S. 2003. PAYSAGRI : modélisation de l'impact des pratiques agricoles sur le paysage Journée scientifique de l'école doctorale ABIES, Paris.

- Dixmieras, J. 1985. Handicaps et surcoûts de l'activité agricole de montagne. *Bulletin technique d'information* 399-401:211-216.
- Dulphy. 1987. Fenaïson : pertes en cours de récolte et de conservation, p. 103-124, In C. Demarquilly, ed. *Les fourrages secs : récolte, traitement, utilisation.*, Paris.
- Dupic, G., and S. Violleau. 1998. Intérêt de l'enrubannage dans les exploitations laitières du Puy-de-Dôme. *Fourrages* 156:501-508.
- Duru, M. 1987. Croissance hivernale et printanière de prairies permanentes pâturées en montagne. I - Ecophysiologie du dactyle. *Agronomie* 7:41-50.
- Duru, M., and H. Colombani. 1998. Haymaking: risks and uncertainties in Central Pyrenees grasslands. *Agricultural Systems* 38:185-207.
- Duru, M., and H. Ducrocq. 2002. A model of lamina digestibility of orchardgrass as influenced by nitrogen and defoliation. *Crop science* 42:214-224.
- Duru, M., and B. Hubert. 2003. Management of grazing systems: from decision and biophysical models to principles for action. *Agronomie* 23:689-703.
- Duru, M., J.L. Fiorelli, and P.L. Osty. 1988a. Propositions pour le choix et la maîtrise du système fourrager. I. Notion de trésorerie fourragère. *Fourrages* 113:37-56.
- Duru, M., J. Nocquet, and A. Bourgeois. 1988b. Le système fourrager : un concept opératoire. *Fourrages* 115:251-272.
- Duru, M., F.C. Coléno, and A. Gibon. 1998. Systèmes d'élevage et aléas climatiques : une approche par modélisation, p. 329-338, In F. Guessous, et al., eds. *Livestock production and climatic uncertainty in the Mediterranean*, Vol. 94. EAAP, Agadir, Morocco.
- DRAF Auvergne, 2002. *L'agriculture en Auvergne à l'entrée du 21^e siècle*. Agreste Auvergne 44.
- Eldin, M. 1989. Analyse et prise en compte des risques climatiques pour la production végétale, p. 47-62, In ORSTOM, ed. *Le risque en agriculture*.
- Finlayson, J.D., O.J. Cacho, and A.C. Bywater. 1995. A Simulation Model of Grazing Sheep: I. Animal Growth and Intake. *Agricultural Systems* 48:1-25.
- Fleury, P., B. Dubeuf, and B. Jeannin. 1995. Un concept pour le conseil en exploitation laitière : le fonctionnement fourrager. *Fourrages*:3-17.
- Fleury, P., B. Dubeuf, and B. Jeannin. 1996. Forage management in dairy farms: a methodological approach. *Agricultural Systems* 52:199-212.
- Gay, J., C. Poix, and S. Depigny. 2001. Logiciel PASSYFOU, Logiciel pour les projets d'évolution des systèmes fourragers.
- Gibon, A., and M. Duru. 1987. Fonctionnement des systèmes d'élevage ovin pyrénéen et sensibilité au climat, p. 303-316 *Agrométéorologie des régions de moyenne montagne*, Vol. 39. Inra.
- Gibon, A., S. Lardon, and J.P. Rellier. 1989. The heterogeneity of grasslands fields as a limiting factor in the organization of forage system. Development of a simulation tool

- of harvest management in the central Pyrenees. *Etudes et recherches sur les systèmes agraires et le développement* 16:105-117.
- Girard, N., and B. Hubert. 1999. Modelling expert knowledge with knowledge-based systems to design decision aids. The exemple of a Knowledge-based model on grazing management. *Agricultural Systems* 59:123-144.
- Girard, N., S. Bellon, B. Hubert, S. Lardon, C. Moulin, and P.L. Osty. 2001. Categorising combinations of farmers' land use practices: an approach based on examples of sheep farms in the South of France. *Agronomie* 21:435-459.
- Gras, R., M. Benoit, J.P. Deffontaines, M. Duru, M. Lafarge, A. Langlet, and P.L. Osty. 1989. *Le fait technique en agronomie Activité agricole, concepts et méthodes d'étude* L'Harmattan.
- Guérin, G., and S. Bellon. 1990. Analyse des fonctions des surfaces pastorales dans les systèmes de pâturage méditerranéens. *Etudes et recherches sur les systèmes agraires et le développement* 17:147-158.
- Hakanson, L. 1995. Optimal size of predictive models. *Ecological Modelling* 78:195-204.
- Hansen, J.W. 2002. Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. *Agricultural Systems* 74:309-330.
- Hansen, J.W., and T. Mavromatis. 2001. Correcting low-frequency variability bias in stochastic weather gegeators. *Agricultural and Forest Meteorology* 109:297-310.
- Hardy, A., X. Le Bris, and P. Pelletier. 2001. Herb'ITCF : une méthode d'aide à la gestion du pâturage. *Fourrages* 167:399-415.
- Hémidy, L., F. Maxime, and L.G. Soler. 1993. Instrumentation et pilotage stratégique dans l'entreprise agricole, p. 91-118 *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, Vol. 28.
- Hengsdijk, H., and M.K. van Ittersum. 2003. Formalizing agro-ecological engineering for future-oriented land use studies. *European Journal of Agronomy* 19:549-562.
- Herrero, M., B.J. Dent, and R.H. Fawcett. 1997. The plant/animal interface in models of grazing systems, p. 495-542, In R. M. Peart and R. B. Curey, eds. *Agricultural System modeling and simulation*.
- Herrero, M., R.H. Fawcett, and J.B. Dent. 1999. Bio-economic evaluation of dairy farm management scenarios using integrated simulation and multiple-criteria models. *Agricultural Systems* 62:169-188.
- Hubert, B., N. Girard, J. Lasseur, and S. Bellon. 1995. Les systèmes d'élevage ovin préalpins, derrière les pratiques, des conceptions modélisables. *Etudes et recherches sur les systèmes agraires et le développement* 27:351-386.
- Huguet, L., and P. Mansat. 1977. De la production fourragère aux systèmes fourragers. *La France agricole* 1652:41-45.
- Ingram, K.T., M.C. Roncoli, and P.H. Kirshen. 2002. Opportunities and constraints for farmers of west Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study. *Agricultural Systems* 74:331-349.

- Jeanin, B., P. Fleury, and J.M. Dorioz. 1991. Typologie régionale des prairies permanentes fondée sur leur aptitude à remplir des fonctions. *Fourrages* 128:377-422.
- Jones, J.W., B.A. Keating, and C.H. Porter. 2001. Approches to modular model development. *Agricultural Systems* 70:421-443.
- Josien, E., B. Dedieu, and C. Chassaing. 1994. Etude de l'utilisation du territoire en élevage herbager. L'exemple du réseau extensif bovin Limousin. *Fourrages* 138:115-134.
- Keating, B.A., and R.L. McCown. 2001. Advances in farming systems analysis and intervention. *Agricultural Systems* 70:555-579.
- Keating, B.A., P.S. Carberry, G.L. Hammer, M.E. Probert, M.J. Robertson, D.P. Holzworth, N.I. Huth, J.N.G. Hargreaves, H. Meinke, Z. Hochman, G. McLean, K. Verburg, V. Snow, J.P. Dimes, M. Silburn, E. Wang, S. Brown, K.L. Bristow, S. Asseng, S. Chapman, R.L. McCown, D.M. Freebairn, and C.J. Smith. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18:267-288.
- Kirchmann, H., and G. Thorvaldson. 2000. Challenging targets for future agriculture. *European Journal of Agronomy* 12:145-161.
- Kleijnen, J.P.C., and R.G. Sargent. 2000. A methodology for fitting and validating metamodels in simulation. *European Journal of Operational Research* 120:14-29.
- Kristensen, T., J.T. Sorensen, and S. Clausen. 1997. Simulated effect on dairy cow and herd production of different grazing intensities. *Agricultural Systems* 55:123-138.
- Landais, E., and G. Balent. 1995. Introduction à l'étude des systèmes d'élevage extensif. *Etudes et recherches sur les systèmes agraires et le développement* 27:13-35.
- Le Bris, X., and M. Duru. 1988. Approches du système fourrager par simulation. *Fourrages* 115:305-321.
- Lee, D.J., T. Tipton, and P. Leung. 1995. Modelling cropping decisions in a rural developing country: a multiple-objective programming approach. *Agricultural Systems* 49:101-111.
- Legros, J.P., J.M. Robbez-Masson, P. Falipou, R. Antonioletti, and R. Durand. 1997. Bibliothèque FLASH de calcul de l'énergie solaire, III ed. Cinq programmes INRA-Science du Sol-Montpellier.
- Lienard, G., G. Baud, and G. Oulion. 1995. Les systèmes de production bovins en montagne. *Bulletin technique d'information* 399-401:359-373.
- Madelrieux, S., B. Dedieu, and L. Dobremez. 2002. Modifications de l'utilisation du territoire lorsque des éleveurs cherchent à résoudre des problèmes de travail. *Fourrages* 172:355-368.
- Mathieu, A., and J.L. Fiorelli. 1990. Modélisation des pratiques de pâturages d'éleveurs laitiers dans le nord-est, les régulations face à l'aléa climatique, p. 135-157, In J. Brossier, et al., eds. *Modélisation systémique et système agraire*. INRA.
- Mathieu, J., and J.L. Raphalen. 1981. Variabilité climatique et systèmes fourragers. *Perspectives agricoles* 53:45-54.

- Mathieu, A., H. Juin, and B. Jeannin. 1986. Influence du climat sur les potentialités des prairies permanentes et les possibilités de leur récolte dans le massif du Jura, p. 351-365, *In* Inra, ed. Agrométéorologie des régions en moyenne montagne, Vol. Les colloques de l'INRA n°39, Toulouse.
- Mavromatis, T., and J.W. Hansen. 2001. Interannual variability characteristics and simulated crop response of four stochastic weather generators. *Agricultural and Forest Meteorology* 109:283-296.
- McCall, D.G., and G.J. Bishop-Hurley. 2003. A pasture growth model for use in a whole-farm dairy production model. *Agricultural Systems* 76:1183-1205.
- McCown, R.L. 2002a. Changing systems for supporting farmer's decisions: problems, paradigms and prospects. *Agricultural Systems* 74:179-220.
- McCown, R.L. 2002b. Locating agricultural decision support systems in the troubled past and socio-technical complexity of 'models for management'. *Agricultural Systems* 74:11-25.
- McCown, R.L., G.L. Hammer, J.N.G. Hargreave, D.P. Holzworth, and D.M. Freebairn. 1996. APSIM: a novel software system for a model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems* 50:255-271.
- Meinke, H., W.E. Baethgen, P.S. Carberry, M. Donatelli, G.L. Hammer, R. Selvaraju, and C.O. Stöckle. 2001. Increasing profits and reducing risks in crop production using participatory systems simulation approaches. *Agricultural Systems* 70:493-513.
- Monteith, J.L. 1996. The quest for balance in crop modeling. *Agronomy journal* 88:695-697.
- Moore, A.D., J.R. Donnelly, and M. Freer. 1997. GRAZPLAN: decision support systems for australian grazing enterprises. III. Pasture growth and soil moisture submodels, and the GrassGro DSS. *Agricultural Systems* 55:535-582.
- Morlon, P., and M. Benoit. 1990. Etude méthodologique d'un parcellaire d'exploitation agricole en tant que système. *Agronomie* 6:499-508.
- Moulin, C., N. Girard, and B. Dedieu. 2001. L'apport de l'analyse fonctionnelle des systèmes d'alimentation. *Fourrages* 167:337-363.
- Mucchielli, R. 1990. Le questionnaire dans l'enquête psycho-sociale ESF éditeur-Entreprise moderne d'édition-Librairies techniques.
- Mullen, J.D., D.B. Taylor, M. Fofana, and D. Kebe. 2003. Integreting long-run biological and economic considerations into Striga management programs. *Agricultural Systems* 76:787-795.
- Murray-Prior, R. 1998. Modelling farmer behaviour: a personal construct theory interpretation of hierarchical decision models. *Agricultural Systems* 57:541-556.
- Nelson, R.A., D.P. Holzworth, G.L. Hammer, and P.T. Hayman. 2002. Infusing the use of seasonal climate forecasting into crop management practice in North East Australia using discussion support software. *Agricultural Systems* 74:393-414.
- Passioura, J.B. 1996. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering. *Agronomy journal* 88:690.

- Peltier, C. 1985. Pente et altitude, facteurs spécifiques de surcoûts pour les équipements de montagne. *Bulletin technique d'information* 399-401:217-227.
- Pleasants, A.B., G.C. Wake, D.G. McGall, and S.D. Watt. 1997. Modelling pasture mass through time in managed grazing system subject to perturbations resulting from complexity in natural biological processes. *Agricultural Systems* 53(2-3):191-208.
- Réseaux d'élevage. 2001a. Référentiel fourrager : caractérisation des zones et des systèmes fourragers d'Auvergne et de Lozère.
- Réseaux d'élevage. 2001b. Référentiel fourrager : Bien gérer l'herbe avec des bovins.
- Reuillon, J.L., and S. Violleau. 1998. Un outil de gestion des systèmes herbagers en élevage bovin: le référentiel fourrager Auvergne-Lozère. *Fourrages* 156:603-609.
- Reuillon, J.L., E. Josien, J.P. Garel, J. Lafon, J. Brial, R. Bouchy, and S. Luminet. 2001. Etude de la faisabilité de l'arrêt de l'utilisation de l'ensilage et de l'enrubannage dans l'alimentation des vaches laitières pour des AOC fromagères du Massif Central, p. 229-235 *Rencontres Recherches Ruminants*.
- Romera, A.J., S.T. Morris, J. Hodgson, W.D. Stirling, and S.J.R. Woodward. 2004. A model for simulating rule-based management of cow-calf systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 42:67-86.
- Rykiel, E.J. 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90:229-244.
- Scholten, H., and A. Udink ten Cate. 1999. Quality assessment of the simulation modeling process. *Computers and Electronics in Agriculture* 22:199-208.
- Sebillotte, M., and L.-G. Soler. 1990. Les processus de décision des agriculteurs., p. 93-118, In J. Brossier, et al., eds. *Modélisation systémique et système agraire*. INRA.
- Shaffer, M.J., and M.K. Brodahl. 1998. Rule-based management for simulation in agricultural decision support systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 21:135-152.
- Sinclair, T.R., and N.G. Seligman. 1996. Crop modeling: from infancy to maturity. *Agronomy journal* 88:698-704.
- Sinclair, T.R., and N.G. Seligman. 2000. Criteria for publishing papers on crop modeling. *Field Crops Research* 68:165-172.
- Soulard, C.T., P. Morlon, and N. Chevernard. 2002. Le schéma d'organisation territoriale de l'exploitation agricole, p. 13 *Entretiens du Pradel: Agronomes et territoires*.
- Stockes, J.R., and P.R. Tozer. 2002. Sire selection with multiple objectives. *Agricultural Systems* 73:174-164.
- Tasser, E., and U. Tappeiner. 2002. Impact of land use changes on mountain vegetation. *Appl. Veg. Sci.* 5:173-184.
- Thenail, C., and J. Baudry. 2004. Variation of farm spatial land use pattern according to the structure of the hedgerow network (bocage) landscape: a case study in northeast Brittany. *Agriculture Ecosystems & Environment* 101:53-72.

- Thornton, P.K., and P.G. Jones. 1998. A conceptual approach to dynamic agricultural land-use modelling. *Agricultural Systems* 57:505-521.
- Thornton, P.K., and M. Herrero. 2001. Integrated crop-livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment. *Agricultural Systems* 70:581-602.
- van Ittersum, M.K., and M. Donatelli. 2003. Modelling cropping systems, highlights of the symposium and preface to the special issues. *European Journal of Agronomy* 18:187-197.
- Veillaux, C., and P. Lépée. 1998. Intérêt de l'enrubannage dans une exploitation de la creuse. *Fourrages* 156:491-494.
- Violleau, S. 1998. L'ensilage d'herbe dans les systèmes bovins laitiers du nord du Massif Central (cas du Puy-de-Dôme). *Fourrages* 156:495-499.
- White, T.A., D. Barker, and K.J. Moore. 2004. Vegetation diversity, growth, quality and decomposition in managed grasslands. *Agriculture Ecosystems & Environment* 101:73-84.
- Woodward, S.J.R., and M.D. Rollo. 2002. Why pasture growth prediction is difficult. *Agronomy N.Z.* 32:17-26.
- Woodward, S.J.R., G.C. Wake, and D.G. McGall. 1995. Optimal grazing of a multi-paddock system using a discrete time model. *Agricultural Systems* 48(2):119-139.
- Yates, C., and T. Rehman. 1998. A linear programming formulation of the Markovian decision process approach to modelling the dairy replacement problem. *Agricultural Systems* 58:185-201.

Annexes

Annexe 1 : Questionnaire de pré-enquêtes

Date de l'enquête
Nom de l'exploitant
Zone fourragère
Système fourrager

1 INFORMATIONS GENERALES

1.1 Main d'œuvre

1 - Liste des personnes qui travaillent sur l'exploitation:

Nom	Tâches	Période de l'année

2 – Période(s) de surcharge en travail ?

3 – Période(s) calmes ?

4 - Recours à des prestataires de service ?

1.2 Bâtiments

1.2.1 Etable

Bâtiment	Nombre de places	Stabulation libre ou entravée	Animaux

1.2.2 Bâtiments de stockage

Bâtiment	Type de stockage (balles rondes, bottes carrées)

1 - Avez vous suffisamment de place pour stocker les fourrages ?

2 - Type de chantier de traite (salle de traite mobile ?)

1.3 Troupeau

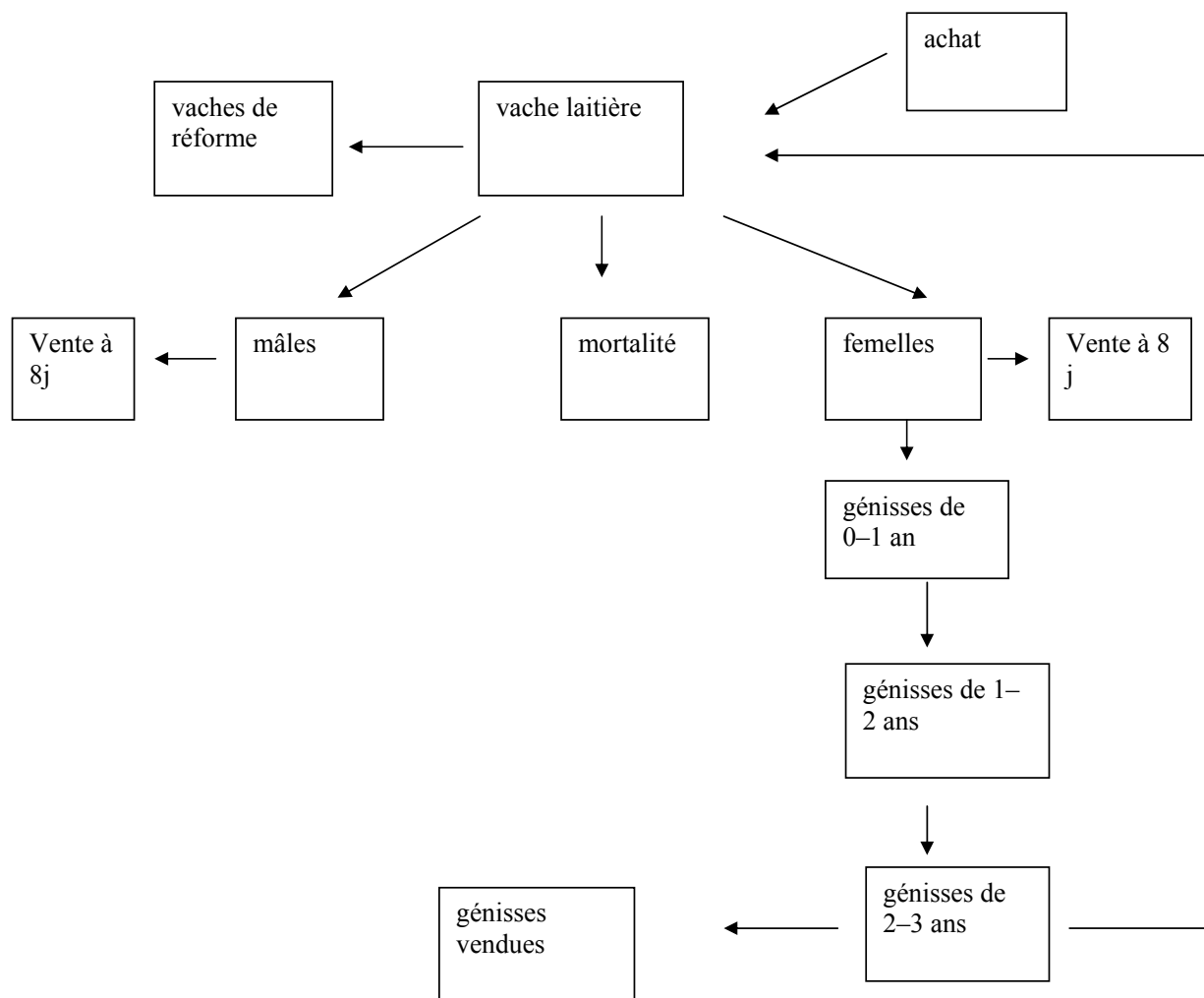
1 - Race(s) des animaux ?

2 - Transformation fermière ?

3 - Nombre d'UGB sur l'exploitation ?

4 – Période(s) de réforme ?

5 - Répartition des vêlages (période) ?



Quota :

Production par
vache par an :

1.4 Parcellaire

SAU :

Surface en prairies temporaires :

STH :

Surface en céréales :

Etablir un schéma du plan parcellaire : utiliser un fond de carte et faire tracer l'ensemble des parcelles de l'exploitation

Caractéristiques des parcelles ou des îlots à indiquer sur un transparent par des symboles

- nom
- surface (S)
- distance en km (d)
- accès
 - facile +
 - difficile –
- séchant/excès d'eau et à quelle période? (s/e)
- point d'eau (p)
- prairie productive ou non
- fauchable (f)
- mécanisable (m)
- mode de faire valoir
- précoce ou non

2 CAMPAGNE PREVISIONNELLE

1.1 Fauche

1 - Description de la chaîne de récolte :

- Faucheuse ?
- Faneuse ?
- Andaineur ?
- Presse ?
- ...

2 - Généralement avez vous une production fourragère suffisante sur l'exploitation ?

3 - Si non quelle stratégie ?

4 - Comment calculer vous les besoins pour l'hiver ?

- Sécurités en cas de mise à l'herbe tardive ?
- En fonction d'une moyenne ?
- ...

5 - Combien d'hectares fauchez-vous en moyenne ?

6 - S'agit-il d'une surface fixe d'année en année ou cette surface peut elle augmenter ou diminuer d'une année à l'autre ?

7 - Rendement approximatif par grande catégorie de fourrages (en nombre de balles rondes par ha) ?

8 - Est-ce que vous allez faire les animaux déprimer les prés de fauche ?

9 - Si oui, déprimage de quelle durée ?

10 - Sur quelles parcelles ?

11 - La première coupe de foin/ensilage/enrubannage commence quand et se finit quand ?

12 - Sur quels critères vous basez-vous pour décider de la date de fauche :

- stade ?
- quantité d'herbe sur pied ?
- conditions météorologiques de récolte (température et nombre de jours sans pluie) ?
- ...

13 - Utilisation des données météo?

14 - Quelles sont les parcelles que vous avez prévu de faucher ?

Etablir le circuit de récolte fourragère à l'aide d'un transparent en précisant les dates

15 - Pourquoi avoir choisi cet ordre de fauche ?

16 - Quelles sont les parcelles que vous avez prévu de faucher deux fois ?

17 - Comment décidez vous de la surface à faucher en regain ? (concurrence stock, pâture) ?

18 - A quelle date a lieu la fauche des regains, quels sont les critères de choix de cette date ?

19 - Est-ce que vous mettez en place des parcelles tampon ?

20 - Quelles sont les parcelles (fauche pâture) dont l'usage va dépendre de l'année ?

21 - Comment vous décidez de cet usage ?

2.1 Campagne de pâturage

2.1.1 Allotement

1 - Description des lots d'animaux

2 - Quelles sont les périodes de conduite homogène ?

Etablir un schéma d'allotement

Etablir le circuit de pâturage par lot d'animaux depuis la mise à l'herbe jusqu'à la rentrée à l'étable

Pour chaque lot identifier à l'aide d'un transparent les parcelles affectées et les dates

3 - Périodes de complémentation des lots d'animaux ?

2.1.2 Pâturage de printemps

Par lot

2.1.2.1 Déclenchement de la séquence de pâturage

1 - Date de mise à l'herbe ?

2 - Critères de choix pour la date de mise à l'herbe :

- prise en compte des stocks hivernaux dans le déclenchement de la mise à l'herbe ?
- estimation du stock d'herbe ?
- prise en compte du climat ?
- ...

- 3 - Est-ce que vous favoriser
- une sortie précoce en prenant le risque de manquer d'herbe en fin de printemps ?
 - tardive lorsque la pousse de l'herbe est bien établie ?

4 - Affectations de parcelles particulières ?

5 - Pourquoi ?

2.1.2.2 Déroutement du pâturage

6 - Type de pâturage (tournant, libre, rationné)

- 7 - Dimensionnement des surfaces affectées en fonction de :
- la productivité d'un passage ?
 - préférez-vous sur-dimensionner avec une capacité de nettoyage de l'excédent d'herbe ?
 - sous dimensionner avec une sécurité ?
 - ...

8 - Qualité du pâturage à atteindre ?

9 - Nombre de cycles de pâturage ?

10 - Durée d'un cycle de pâturage ?

11 - Temps de repos entre passage ?

12 - Pourquoi avoir choisi cet ordre de succession des parcelles ?

- 13 - Règle de passage d'une parcelle à une autre
- état de la parcelle pâturée ?
 - état des autres parcelles ?
 - ...

14 - Quelles sont les opérations d'entretien pratiquées (gyrobroyage, fauche des refus ?)

15 - A quelle date ?

16 - Sécurités prévues par rapport aux aléas (sécheresse, déficit hydrique, froid, excès d'eau) :

- modifications de lot ?
- achat de fourrages ?
- modification des affectations stock/pâture ?
- zone tampon ?
- ...

2.1.3 Pâturage estival

17 - A quelle date élargirez vous la surface de pâture ?

18 - Sur quels critères ?

19 - En cas de problèmes de sécheresse, quelles adaptations ?

2.1.4 Pâturage automne

20 - Est-ce que vous faites pâturer les regains ?

21 - A quelle date ?

22 - Quelles adaptations en cas d'aléa climatique ?

23 - Date de rentrée à l'étable ?

24 - Critères ?

25 - Est-ce que la quantité de foin récoltée influe sur la date de rentrée à l'étable (en cas de faible récolte) ?

2.2 Fertilisation

1 - Quelles sont les parcelles fertilisées et à quelle date ? :

- Fertilisez vous les pâtures ?

- Fertilisez-vous les prés de fauches ?

2 - Critères de choix des parcelles et dates ?

3 - Nature et dose d'engrais appliqués :

- Fumure organique
- Fumure minérale

2.3 Récapitulatif

A l'aide d'un transparent récapituler pour chaque parcelle son mode d'utilisation

2.4 Alimentation hivernale (facultatif)

Identifier la nature de la ration selon la catégorie d'animaux

Type de foin caractéristiques, tonnage acheté, produit...	Catégorie d'animaux			
	Vaches laitières	Génisses moins d'un an	Génisses	
Foin				
Regain				
céréales				

3 Changement *

* Dans les exploitations où il y a eu changement (adoption d'un CTE, arrêt de l'ensilage...)

1 - Pourquoi ce changement ?

2 - Quelles transformations cela a provoqué ?

3 - Etes vous plus sensible à l'aléa climatique ?

4 - Avez-vous constaté des changements de flore ?

Calendrier d'utilisation des blocs par les lots

[illegible]

Annexe 2 : Diagrammes de pilotage simplifiés des ateliers pâturage des vaches laitières et production de fourrages stockés

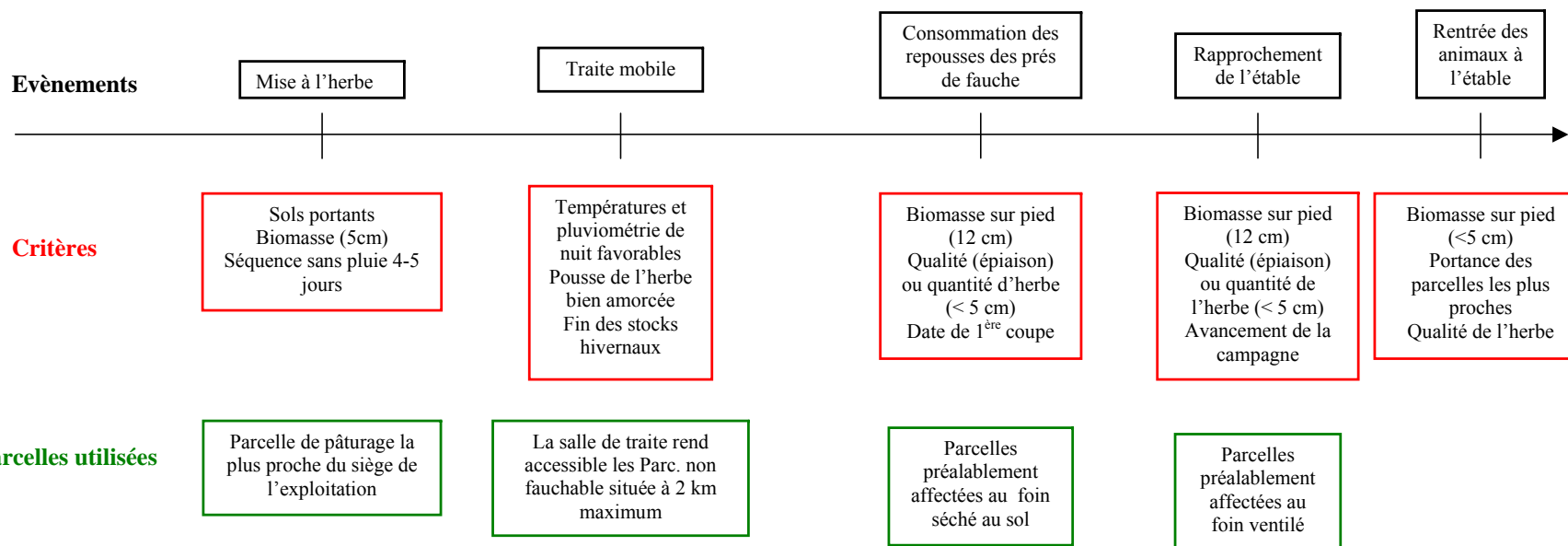
Atelier pâturage des vaches laitières

Régulations

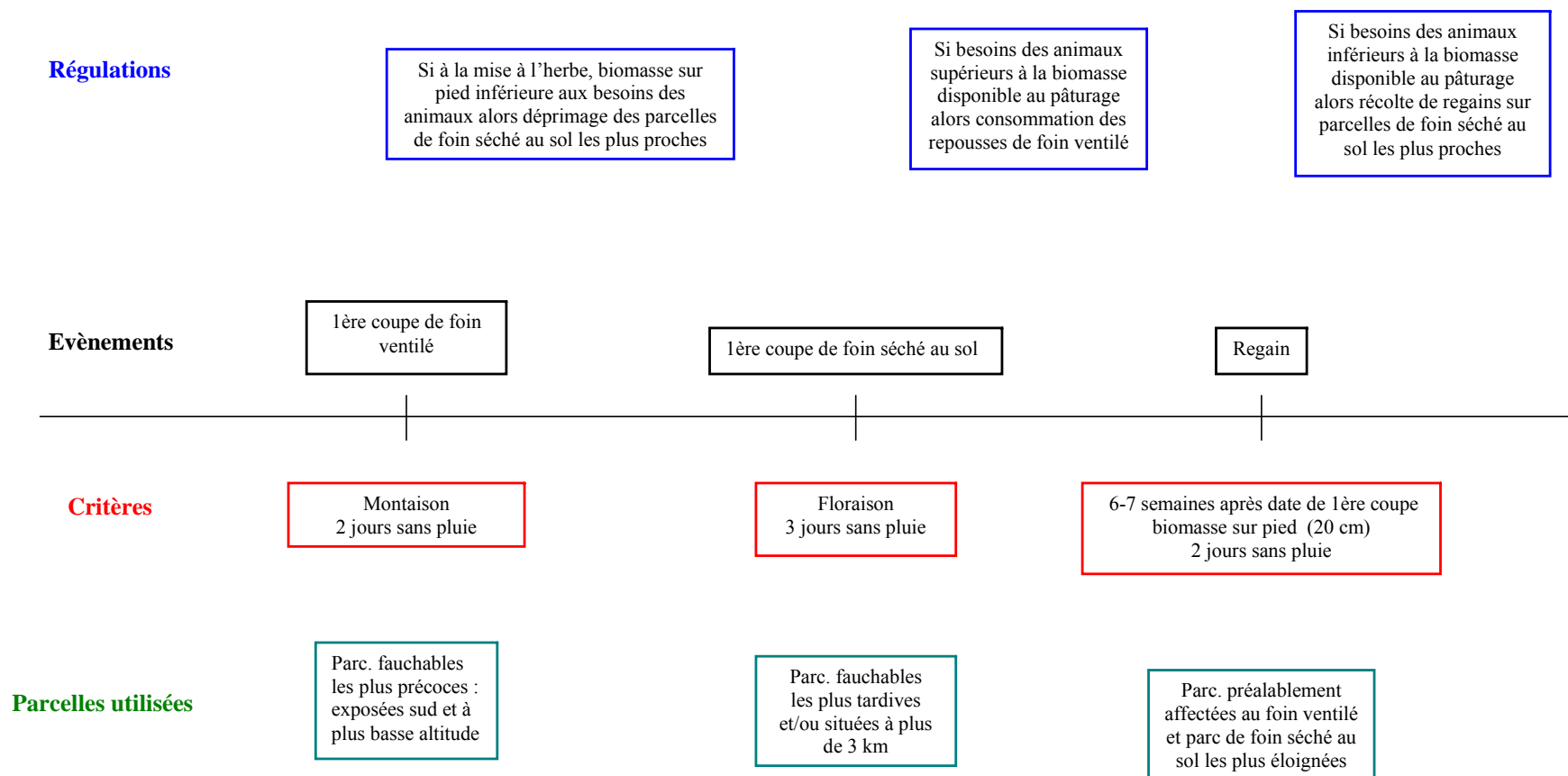
Si à la mise à l'herbe, la biomasse sur pied inférieure aux besoins des animaux alors déprimage des parcelles de foin séché au sol les plus proches

Si besoins des animaux supérieurs aux stocks d'herbe disponibles au pâturage alors consommation des repousses de foin ventilé

Si besoins des animaux inférieurs aux stocks d'herbe disponibles au pâturage alors récolte de regains sur parcelles de foin séché au sol les plus proches



Ateliers de production de fourrages stockés



Annexe 3 : Guide d'entretien pour le suivi de la séquence de printemps

Date de l'enquête
Nom de l'exploitant
Zone fourragère
Système fourrager

1 - Problèmes rencontrés depuis la mise à l'herbe

- récolte ?
- élargissement de la surface de pâturage ?
- stockage ?

2 - Le climat vous a-t-il perturbé pour :

- dates de récoltes
- rendement
- élargissement de la surface de pâturage

3 - Comment caractériser vous l'année 2002

- normale ?
- ...

4 - Utilisation des surfaces tampons ? pourquoi ?

5 - Il y a t-il des parcelles que vous n'aviez pas prévu de faucher et qui l'ont été ?

6 - Vous a t-il manqué de l'herbe de qualité vous obligeant à faire pâturer des parcelles qui devaient être fauchées ?

Relever éléments marquants sur le calendrier de pâturage (durée de séjour, dates...)

Compléter les informations manquantes par rapport à la visite précédente

Annexe 4 : Apports de concentrés et de fertilisants

Eleveur	Concentrés	Atelier pâturage		Atelier de première coupe précoce		Atelier foin de première coupe		Atelier regain
Be	205g/l	0-20-30 (200 kg/ha) <i>14-11-21 (150 kg/ha)</i>		-		Parc. exp. sud 14-11-21 (400 kg/ha) compost (10t/ha) Parc.exp nord ou plates 14-11-21 (300 kg/ha) compost (10t/ha)	14-11-21 (200 kg/ha)	
Ma	200g/l	Parc. proches	Lisier (10 t/ha) 0-20-30 (150 à 200 kg/ha)	-		Lisier (20-30 t/ha) 0-20-30 (200 kg/ha)		Rien
		Parc. éloignées	Lisier (25 t/ha)					
Go	250g/l	Lisier (20-25 m ³ /ha) 0-20-30 (250 kg/ha)		Lisier (25 m ³ /ha) 14-11-21 (400 kg/ha)		Lisier (25 m ³ /ha) 0-20-30 (250 kg/ha) Ammonitrate (100 kg/ha)		Ammonitrate (200 kg/ha)
Ch	334g/l	25-5-12 (150 kg/ha) Ammonitrate (100 kg/ha)		Parc. déprimées	Lisier (30t/ha) Ammonitrate (100 kg/ha) lisier	Lisier (30 t/ha)		Ammonitrate (100 kg/ha)
				Parc. non déprimées	Lisier (30 t/ha) Ammonitrate (100 kg/ha)			
Am	297 g/l	Fumier Scories potassiques (600 kg/ha)		-		Fumier Ammonitrate (150 kg/ha) scories potassiques 1 année sur 3 (1 t/ha)		Ammonitrate (100 kg/ha)
Mo	270g/l	Ammonitrate (200 kg/ha)		Ens.	Ammonitrate (300 kg/ha) 0-17-30 tous les 2 ans	Ammonitrate (100 kg/ha) purin (30 m ³ /ha)		Ammonitrate (150 kg/ha)
				Enr.	Chaulage Ammonitrate (250 kg/ha) 0-17-30 tous les 2 ans			
Me	321g/l	Purin (40 m ³ /ha) 15-15-15 (250kg/ha) <i>Ammonitrate (100 kg/ha)</i>		-		Purin (40 m ³ /ha) 15-15-15 (300 kg/ha)		<div>Mis en forme : Anglais (Royaume-Uni)</div> <div>Mis en forme : Anglais (Royaume-Uni)</div>

En italique sont indiqués les engrais apportés occasionnellement en cas de pousse de l'herbe insuffisante

Annexe 5 : article soumis à *Agriculture Ecosystems & Environment*

Effect of the diversity of grassland communities and field characteristics on land use management practices assessed at the farm level

Nadine Andrieu^{a*}, Etienne Josien^a, Michel Duru^b

^a CEMAGREF, *Dynamiques et fonctions des espaces ruraux*, 63172 Aubière cedex

^b UMR 1248 INRA-ENSAT Agrosystèmes cultivés et herbagers BP 27 31326 Castanet - Tolosan

- Corresponding author. Tel.: +33-4-73440634; fax : +33-4-73440698. E-mail address: nadine.andrieu@clermont.cemagref.fr

Abstract

In order to assess the impact of policies to encourage extensification in less favoured areas, we compared the diversity of plant communities with (1) the field characteristics likely to have a direct effect on the grassland community types (altitude, orientation) or else have an influence on their use (distance from the cowshed, slope, surface area), and (2) the land use management practices (cutting vs grazing, fertilisation). The latter are studied by specifying the grazing management rules of the herd (dairy cows), as well as those for conserved forage (mainly hay or silage). This study was conducted on a mountainous area in the centre of France. It was based on 149 fields, mainly of natural grasslands belonging to 7 farmers. The relations between the grassland community types (5 types established from the list of dominant species), management practices (cutting vs grazing, fertilisation) and the topographic (altitude, orientation) and topological (slope, distance, surface area) characteristics of the fields were studied statistically. The land use management rules used by the farmers were identified from observations mentioned on the “grazing schedules”, as well as from interviews at the beginning, in the middle and at the end of the study period. We showed that there was no direct effect of the topographic characteristics of the fields nor of the distance from the cowshed or the surface area on the grassland community type. It was the management practices used, greatly determined by the slope, which determined the grassland community type. We also showed that the grazing and cutting management rules were greatly determined by the slope, the surface area of the fields and the distance from the cowshed and to a lesser extent by the altitude and orientation. These results showed that the farmers take into consideration the differences in the environment to determine the fields to allocate

for grazing and cutting at different seasons, and all the more so when they are constrained by these differences. Nevertheless, when the constraints were minimal, a large diversity of grassland community types was also observed. This diversity was a result of attributing different functions to the fields which led to different management practices (farming methods and fertilisation) and thus to different grassland community types. Consequently, in farms where animal feed requirements vary according to the time of the year and according to the batch, we can put forward the hypothesis that diversity in the grassland community types is sought after.

Keywords: grassland, diversity, grazing, cutting, fertilizer, mountain

1. Introduction

Up until the 1980's, French and European agricultural policies, by supporting products, in fact encouraged intensification. The suppression of limiting factors resulted in a standardization of production systems, which also facilitated management practices. Furthermore, this led in less favoured areas to deserted fields according to criteria of usability (distance or access, mechanisability, etc) (Tasser and Tappeiner, 2002). Since the 1990's, the agricultural policies have evolved in order to encourage extensification by subsidies per hectare (premium for grass for livestock farms) in order to maintain or increase the biological diversity which has become an important issue (Kirchmann and Thorvaldsson, 2000). In grassland zones dominated by natural pastures, an important component of this biological diversity corresponds to the diversity of grassland species. This diversity is generally assessed on the within-field scale (Grime *et al.*, 1988; Bakker *et al.*, 2004), or between farms to across regions (Thenail and Baudry, 2004). These questions are even more pertinent in mountainous zones where the areas used for farming are constituted almost exclusively of natural grasslands (Flamant *et al.*, 1999). In these situations, grazing or cutting operations make it possible to feed domestic herbivores, but are also a means of preventing ligneous species from colonising these environments (Landsberg *et al.*, 2003). The farm territory is the level considered by farmers to allocate land use to fields, linking land use to field types, coordinating their decisions (Papy, 1999). Evaluating and predicting the impact of such policies on biological diversity necessitates describing and assessing this diversity on the between-field scale at the farm level and no longer only on the landscape scale. Indeed, it is at the between-field scale that management rules are decided for using fields likely to have an influence on the diversity of grassland community. In this paper, we consider the plant component of biological diversity, and we give greater importance to the between-field scale after having defined the criteria selected for characterising the diversity of grassland communities.

The criteria which must be taken into account concern both the diversity of the grassland vegetation, but also the diversity of the field characteristics likely to have a direct or indirect effect (via the choice of defoliation and fertilisation practices) on the former. In other words, for livestock farms where the feed for the herds comes almost exclusively from natural grasslands, we propose

studying the relations between grassland communities, field characteristics and land use management practices.

To characterise the vegetation at the grassland community level, we considered plant functional diversity rather than the diversity of species. Plant functional diversity is assessed by defining plant functional types (PFTs) that has been undertaken by grouping together populations of species which exhibit common biological traits enabling them to respond to environmental factors and to fulfil specific functions in a similar way within an ecosystem (Gitay and Noble 1997) by their common features of morphology, physiology and phenology (Hooper and Vitousek, 1997). PFTs can be determined using several approaches, recently reviewed by Diaz *et al.*, (2001) and Lavorel (2002). Indeed, for grassland communities moderately anthropised, as those studied here, resource supply and disturbance are the most important environmental factors for the plant community (Kleyer, 1999). Defoliation management and nutrient availability are the main factors that drive the specific diversity (Huston, 1994). It has been shown that each grassland community could be tied up with a dominant plant functional type (Cruz *et al.*, 2002 ; Ansquer *et al.*, 2004).

Environmental factors that could act upon plant functional types are weather variables in relation to the altitude, the orientation of the field (Bornard *et al.*, 2004), and soil characteristics (soil texture and depth). These variables could lead to differences in growth conditions (temperature, radiation, water availability) at the plant community level. Altitude has an effect on temperatures, orientation has an effect both on the incident radiation (Legros *et al.*, 1997), and on the temperature, this last effect being more complex. The topographic variables studied were the altitude and the orientation.

Other field characteristics that could be considered by farmers for grassland management are the slope, the distance from the cowshed, and the surface area of the field (Fleury *et al.*, 1996), (topologic features). Finally, the system of land tenure could determine how some fields are managed.

We aimed at studying the relationships between the topographic and topologic field characteristics, the management practices (fertilisation and defoliation) and the dominant plant functional type to address the 3 following questions:

- Does the main plant functional type of a grassland community depend on the topographic field characteristics or/and on the management variables? We assumed that for the range of ecological gradients studied, it is mainly the management practices which shape the dominant functional type (Balent *et al.*, 1998).
- Do the management practices applied by the farmers depend on the field characteristics, as suggested by Morlon and Benoit (1990)? Indeed these authors have distinguished and proved the role of the physical (topography, soil) and legal constraints on the one hand, and structural land constraints (field size and shape, distance between the fields and the buildings, obstacles to cross to get there) on the other hand. In extensive bovine farming, Josien *et al.* (1994) carried out a structural division of the field pattern into blocks (groups of fields separated from each other by an obstacle). It was thus shown that the blocks turn out to be like functional units within which various factors interact in coherence

with a production project: uses by batches of animals, cutting, cereal/temporary grassland rotations. Like these authors, we assumed that field characteristics determine the spatial distribution of the management practices and consequently the vegetation types.

- Does the diversity of grassland community types at the farm level constitute an asset or indeed an obligation to feed cows in low input production systems? Indeed, for a livestock farmer, grassland is valued for the functions it provides in the rearing system. The functions are determined by the objectives of the production systems and consist essentially of feeding the herbivores (Guérin and Bellon, 1990). Some grassland communities are used to provide forage stocks with both quantity and quality as objectives; others are used mainly for grazing, which may be managed intensively for high-production animals or extensively for maintenance animals. In this way, some criteria of field or vegetation diversity could take advantage to fulfil different functions at the farm level (Bellon *et al.*, 1999).

Each question will be dealt in a specific section. To answer these questions we will consider two kinds of information. At the field level, we study the statistical relations between grassland community types, field characteristics and recordings made by the farmers to describe their fertilisation and defoliation practices. At the farm level, we compare livestock farming on the basis of survey data. It involves identifying the reasoning behind how farmers act based on analysing farming practices (Landais and Deffontaines, 1988).

2. Materials and Methods

2.1. Choices of the study zone and livestock farms

The Auvergne region in the Massif Central in France (latitude 44.6° to 45.2° North, longitude 2.3 3.25°) where the majority of livestock systems are based on the use of grass was chosen as the study area. The average stocking density is 1 LU/ha and the fertilisation levels are low (Réseaux d'élevage, 2001). This extensive livestock farming is characterised in particular by the spatial-temporal diversity of the resources used within the same farm (Bernhard, 2002). The farms chosen were located in different pedoclimatic zones (called "volcanic all grass", "granitic in altitude", "ploughed volcanic") where the climatic constraints were likely to influence the land use management practices (Réseaux d'élevage, 2001, pre-survey Andrieu, unpublished). The "volcanic all grass" zone was characterised by high rainfall (1350 mm/year) which constitutes a constraint for the turnout to pasture or the cutting dates. The "ploughed volcanic" and "granitic in altitude" zones were characterised by a lack of grass during summer due respectively to the low rainfall (800 mm/year) or to filtering soils (granitic sands), which represents a constraint during the summer period.

We did not attempt to constitute an exhaustive sample of the range of herbivore farming systems existing in Auvergne. Instead, we set out to investigate the systems whose land use management rules, that govern practices, would be simpler to study. The farming systems chosen therefore met the

following requirements: they were specialised in dairy cattle, with a feeding system based on grass (not maize), and a majority of natural grasslands. Furthermore, we have chosen to investigate systems likely to have distinct management rules in relation with the different methods of storing forage (silage, field-dried hay and ventilated hay, wrapping). In the "volcanic all grass" zone, we chose to have one representative per forage storage method (two for field-dried hay). In the "ploughed volcanic" and "granitic in altitude" zones, we chose to study only two systems: a system using field-dried hay with the risk of not having enough grass during summer (for grazing aftermath) because of late regrowth, compared to a silage system which may have early regrowths. In total, seven farms were studied during the 2002-2003 season (Table 1). Only two farmers (Me and Mo) had a part of their forage area in sown grasslands (Me: 7 ha, Mo: 11 ha) which for Mo were exclusively for silage. The recordings made were based on 149 fields farmed by these seven farmers.

2.2. Characterisation of grassland community types and fields

Each field was examined to characterize the grassland community type it belonged to. To facilitate the grassland description, 5 grassland community types were designated according to the dominant species encountered in the studied area, before making the observations. The relationship between diversity, growth and quality was due to dominant species and their functional characteristics (White *et al.*, 2004). The ranking of dominant species in 5 types was established on the basis of their strategy for nutrient acquisition and for defoliation (Ansquer *et al.*, 2004). Visual observations were made to identify dominant species.

1: productive grasses with broad leaves (*Lolium perenne*, *Dactylis glomerata*), and more than 10% of legumes

2: idem with few or no legumes

3: less productive grasses with broad leaves (*Holcus lanatus*, *Poa pratensis* and *trivialis*, *Alopecurus pratense*)

4: mixture of grasses with broad (see above) and narrow leaves (*Festuca rubra*, *Agrostis capillaris*, *Anthoxantum odoratum*)

5: mainly grasses with narrow leaves living in nutrient-poor habitats (*Nardus stricta*, *Descampsia flexuosa*), and some bushes.

The topographic characteristics of the fields (altitude, orientation) were initially identified by a field visit. This information was recorded on maps (scale of 1/25000). The position of the fields on the map made it possible to calculate the average altitude. The identification of the topologic characteristics (distance, slope and size) took place in the same way (field visits and field map) but also from the point of the view of the farmer for the slope, seen in terms of mechanisability.

2.3. Characterisation of the management practices and the rules that govern them

The farming practices were characterised by three criteria: fertilisation supplied, nature of the first defoliation, and date of the first defoliation. This information comes from the “grazing schedule”, a document where each farmer has recorded his management practices during the season.

In order to study the rules governing defoliation and fertilisation practices, it was necessary first to identify the functional management entities, called production units. Different authors have shown the need to break down the production system into elementary units (Hémidy *et al.*, 1993; Chatelin *et al.*, 1993). In livestock farms, the following entities are set apart: the grazing of the different batches of animals and the workshop to yield conserved forages (Coléno and Duru, 1998). Decision-making rules, which also need to be identified, govern the assignment of surface areas to each of the units. This assignment is planned before the season then adapted during the season. This planning involves the farmer determining the basic surface areas (Bellon *et al.*, 1999) which will be allotted with certainty to the different units, as well as the safety areas (Bellon *et al.*, 1999 ; Guérin and Bellon, 1990). During this planning, the farmer also determines a livestock feeding schedule and key moments for which there will be an evaluation of the progress of the operations and whether or not they correspond to the planning. In this study, we focus on the planning, as the management is subject to changing situations each year (in particular certain types of adaptations to the conditions of the year). This planning results from the recurrent and cyclical nature of the different activities (Aubry *et al.*, 1998) and is relatively stable over several years. For each farm, there were two main sources of information. Surveys were carried out at several periods of the season. They set out to identify the planning rules before the season and compare them with the decisions during the season in order to possibly specify the rules. Farmers' recordings concerned the forage schedule which recapitulates what activities are allocated to the fields each day (cutting, grazing), the batches of animals (producing cows, dry cows, heifers), fertilisation practices.

This approach focuses as much on the way farmers act (identification of rules) as on the content (the precise knowledge of the processes which are guided by the decisions) (Roy, 1992; Chanal *et al.*, 1997).

2.3. Processing data

The data on the diversity of grassland communities between fields are already coded from 1 to 5 by the type of information acquisition.

The slope has two codes depending on whether it can be cut or not, field orientation had 3 codes (NE, NW, N = 2, SE, S, SW = 0, flat = 1). Coding for fertilisation practices organises the grasslands into a hierarchy according to the level of nitrogen fertilisation (from 1 to 6) (Table 2). Concerning the types of farming (coded from 1 to 3), this involves grouping together the practices in relation to the earliness of defoliation, which is itself in general related to the level of intensification of the grassland

(quantity and earliness of the harvest on grasslands used for silage or wrapping > on grasslands cut for field-dried hay > on grasslands used for grazing only).

The distribution of 149 fields was carried out and the (Pearson) correlation tests between the different diversity criteria were conducted. The standard deviation of each of these parameters (practices, grassland community and field characteristics) seems to us to be an indicator of their diversity. Finally we make a comparison between livestock farms.

Three main units were considered to analyse decision-making rules: grazing for producing cows, early (silage, ventilated hay or wrapping) or late harvesting conserved forage (field-dried hay). For each of these units, we specify the characteristics of the fields which are attributed to it. The determinants of this choice are analysed.

3. Results and discussion

3.1 Data distribution

The analysis of the data, all farms combined, showed that the topographic and topologic characteristics (surface area and slope of fields, distance from the cowshed) were highly variable (figure 1). The dominant modes were the fields between 0.5 and 1 ha and distances less than 0.5 km. A little less than a third of the fields were sloping (not mechanisable). A third of them were facing south (or SW, SE) and less than a quarter were facing north (or NW-NE). The altitude varied from 1000 m to 1200 m for two-thirds of the fields.

Half of the fields were grazed only, the other half (cut at the first harvest then grazed) was in equivalent proportions cut and field-dried (late harvest) or kept as silage or ventilated hay (early harvest). The date of first defoliation was highly variable and for $\frac{3}{4}$ of the fields was situated between April 10 and June 20.

The most frequent fertilisation practices concerned only the application of mineral fertilisers (NPK or N). The most frequent types of vegetation were types 3 and 4.

The 3 criteria for characterising management practices were significantly correlated between each other. The correlation was highest between fertilisation practices and the nature of the first defoliation (-0.78***). In other words, the fields used for silage (or wrapping) were the most fertilised, whereas the fields which were only grazed were fertilised very little or not at all. On the other hand, when the grazed grasslands were considered separately from those which were cut at least once, there was no significant correlation between the date of the first defoliation and the fertilisation practices.

3.2 Does the main functional type of grassland community depend on the topographic field characteristics or on the management variables? (first question)

The orientation or the altitude – *a priori* likely to have an influence on the type of vegetation – did not have a significant effect for the ranges of variation considered ($P > 0.05$). The same applied to the surface area characteristics and the distance of the fields from the cowshed. On the contrary, a very significant relationship ($r=0.63$; $P<0.001$) was observed with the mechanisability or non mechanisability of the fields (slope) (Table 3).

The grassland community types were correlated significantly to each of the 3 criteria characterising the management practices; the highest correlation was observed with the nature of the first defoliation (Table 4). However, when the 3 criteria were considered together, only the nature of the first defoliation appeared to be significant. When the fields which were grazed only and the fields which were cut at least once were considered separately, the fertilisation practices were not significantly correlated with the grassland community type, and only the date of the first use was significantly correlated ($P < 0.05$) in the case of the fields grazed only.

At the farm level, the comparison of the standard deviations calculated for each of the diversity criteria, on the basis of the data of each field, made it possible to classify the farms. We observed that Be and Ch were always situated in first or second position in terms of standard deviation for altitude, orientation, slope, distance and surface area for Be (Table 5). Mo, Me and Am followed, but the latter had a grouped field pattern. Ma had a field pattern which was a little less diversified but dispersed. Finally, Go had a field pattern which was not very diversified even if we observed a diversity in terms of surface area.

The proportion of sloping fields, whose importance was shown in the previous section, was similar between farms, except for Go and Mo whose field pattern included only 10% which was not able to be cut. The standard deviations concerning the management practices were the highest for the date of the first defoliation and the lowest for the nature of the first defoliation. For the grassland community types, the standard deviations were similar between farms (from 1 to 1.3), except for the farm Am where it was 3 times lower. The relationship previously calculated over all the fields between the diversity of farming practices and the diversity of grassland community types could also be observed for each of the farms (Fig. 1), which shows its generic nature.

The analysis of the diversity criteria by farm confirmed that at this scale there was no relationship between the field characteristics and the vegetation types:

- the farmers who had a diversified field pattern (Be, Ch, Mo, Me) had a diversity of grassland community types;
- the farmers who had a field pattern which was not very diversified (Go, Ma) also had a diversity of grassland community types;
- on the contrary, Am which had a field pattern which was fairly diversified had a certain homogeneity of vegetation (up until the year preceding the survey, this farm was managed in a much

more intensive way, with 1.4 LU/ha), a greater diversity of field characteristics (distance, slope, altitude and orientation) compared with other farms and a lower diversity of grassland community types;

- all the farmers had a diversity in their management practices.

This analysis made at the farm level showed that in the studied area (low stocking rate, almost of the whole area being natural grassland), the diversity of plant communities was observed whatever the extent of the diversity of field characteristics. Furthermore, the analysis of the management rules revealed that farmers did not indicate the type of vegetation as a determining factor in field allocation, whereas such a relationship exists because the grasslands which are grazed only correspond mainly to the 3, 4 and 5 vegetation types, and those which are yielded for conserved forage correspond most often to the 1, 2 and 3 vegetation types (Table 6).

The analysis of the field network showed that the orientation and altitude which were likely to modify climatic characteristics locally did not have a direct influence on the grassland community types. At the farm level, there was no link between the diversity of grassland community types and field characteristics. The altitude and orientation variables probably concerned the gradients which were too small to be seen by differences in grassland community types, at least at the level of accuracy chosen to assess them. On the contrary, for studies done on alpine vegetation covering a wide range of altitudes, a significant effect of topographic attributes was observed (Pfeffer *et al.*, 2004). Consequently, as far as the level of precision retained for this study was concerned, we could consider that the topographic variables did not have any significant effect on the grassland community types (Lieffers and Larkin-Lieffers, 1987). They therefore appeared to be more correlated with the management practices of the farmers than with the altitude and the orientation of the field, as observed in another mountainous range (Balent *et al.*, 1998 in the central Pyrenees). The comparison of the soil mineralogical characteristics carried out between Mo (granitic) and Ch, Ma, Am (volcanic, at the same altitude), did not show any significance differences in the vegetation type. Other soil characteristics (nature, depth), not studied here, were also likely to have an influence on the grassland community. Given the cumbersomeness of data acquisition, only 32 fields underwent soil measurements (texture and depth), which was not sufficient to be able to come to any satisfactory conclusions. Nevertheless, we could consider that slope and fertilisation were strongly related to two major soil characteristics: the slope to depth and fertilisation to chemical wealth. In the end, topographic features could act upon on the vegetation composition, but only on subordinated species (Grime *et al.*, 1988) not recorded here, but not on dominant species that are the only ones considered here.

Three elements support the hypothesis that the main functional type of grassland community depends on the management practices:

- at the field level, both management variables which have an effect on the grassland community types were significant as observed in numerous studies on temperate areas (Grime *et al.*, 1988; Cruz *et al.*, 2002);
- at the farm level, the diversity of plant communities was observed whatever the extent of field characteristic diversity;
- the management rules did not mention the type of vegetation as a determining factor in field allocation.

This confirms that at the local-scale, species richness depends on fertility and nutrients, as observed elsewhere (Ryser and Urbas, 2000). These results also show that the highest fertiliser applications were carried out in the fields which were cut early, that is those where the mineral exports and where the number of cuts were likely to be the highest.

In this study, we have not considered the intra-community specific diversity which can be high in the fields which are grazed exclusively and are the least fertilised (Dumont *et al.*, 2001). It is nevertheless a fact that at the level of integration which the study is conducted at, it is more the inter-community diversity which is to be taken into consideration at the level of the farms (Ansquer *et al.*, 2004).

3.3 Do the management practices applied by the farmers depend on the field characteristics? (second question)

The analysis of the field network showed that the slope was the only one of the 5 topologic and topographic characteristics of the fields which was significantly correlated with the farming methods (date and nature of the first defoliation) and with the fertilisation practices (Table 7). Orientation and the surface area of the fields had no significant effect on these 3 characteristics of the practices. However, the date of the first use of the field for cutting or grazing increased significantly with the distance and the altitude of the field. It was also later for the non mechanisable fields (sloping). When the fields which were grazed only or cut at least once were considered separately, the distance and the altitude were also correlated significantly to the date of the first defoliation (respectively = 0.38 and 0.55; $P < 0.001$). A more detailed analysis showed that the fields which were not mechanisable (sloping) were significantly attributed to dry cows or heifers (not shown).

The practices were therefore strongly related to the slope (mechanisable or not); the parameters of distance and altitude also exerted an influence on the date of the first defoliation.

The characterisation of the management rules showed that the fact that a field is mechanisable or not (according to the slope) is very justified when the cutting area per animal unit is low (Ch, Be). In this case, the whole mechanisable area is inevitably allocated to yield conserved forages (Table 1).

As the stocking rates are similar between farms (Table 1), it is the field structure, and more precisely the mechanisable area per animal unit that determines the thresholds of distance that are

compatible with daily movement of the herds. That makes it possible to distinguish grazing fields allocated to milking cows which come back every day to the cowshed for milking, and to other animals (dry cows, heifers) which can stay several consecutive days in the same pastures. The field distance determines the area which could be used by milking cows, and consequently the importance of grazing in the feeding system. We observed that milking cows used fields that are close to the cowshed (average distance <0.5 km), except for farmers (Be and Ch) who move the milking machine. Farmers systematically take account of the field distance to allocate field to the grazing animal groups (Table 8). For fertilisation of grazed only pastures, farmers Be and Ch, Me and Ma take the field distance into account. The field distance also influences their allocation for cutting. When within a farm, there are several conserved forage modes (hay, silage...), the orientation and the altitude were taken into account because they have an effect on the plant phenology. On average, there was an interval of one month between the beginning and the end of herbage cutting; taking account of the orientation and the altitude allows cutting in first the fields where the herbage growth begin the earliest. The topographic characteristics were not taken into consideration for the use of pastures (excepted the altitude for Ch). When silage was done, other topologic field characteristics (field size) were taken into account.

The statistical analysis for all the fields showed that the slope always significantly conditioned the management practices, the cutting obviously, but also the fertilizer practices and the date for the first defoliation. The altitude and the distance influenced the date of the first defoliation. The interviews of farmers about the factors they considered for field allocation confirm that they take account of these characteristics, but also of the other field characteristics.

We note that there is no contradiction between the statistical approach pooling the whole data, and the engineering approach based on farmer interviews providing a sharper analysis. Farmer interviews have shown that field characteristics make it possible to explain the spatial distribution of the management practices at the farm territory level. In other words, field characteristics (among other factors such as labour) are a strong determinant of the spatial distribution of management practices. However, the topologic and the topographic field characteristics do not have the same role in the decision-making concerning field allocation. Taking topologic field characteristics into account depends on labour constraints (moving grazing animal from one field to the next, shape of the field for silage,...). Several authors have already mentioned that it is necessary to take into consideration field characteristics such as its shape, size, and distance when the aim is to understand the allocation rules (Morlon and Benoit (1990), Josien *et al.* (1994), Culos (1996)). The topographic characteristics are taken into account to increase the forage system efficiency (decreasing the need for conserved forage, improving the forage quality...), and to reduce the effect of the weather variability between years (Andrieu *et al.*, 2004).

The field characteristics could be distinguished according to their sensitivity to the year to year weather variations. The topologic characteristics did not interfere directly with weather characteristics, and then the topographic characteristics could lead to differences in herbage mass, earliness of spring growth. For the studied farms, there were always differences in the topologic characteristics between fields. On the other hand, the between-field topographic characteristics varied according to the farm. In fact, for the farms where this diversity is great, farmers on the one hand depend on fields having a security role (varying the area allocated per animal unit), and on the other hand vary the field use order. These last changes make it possible to limit the amount of hay given at grazing. Farmers for which the diversity of field topographic characteristics is low, only rely on fields having a security role (Andrieu *et al.*, 2004). Consequently, the decision-making rules are dependent on the importance of field constraints:

- when the level of constraints is high (Ch, Be), these characteristics overdetermine the management practices, and consequently the vegetation types;
- when the level of constraints is lower (low proportion of non mechanisable fields – Go, Ma – low degree of field fragmentation – Go, Am.), the spatial distribution of management practices will probably depend on labour organisation (limitation of the distance to move the grazing animals) and on risk management (effect of weather), that give a relative stability of the spatial distribution of management practices, and determine the vegetation type.
- at intermediate field diversity (Mo, Me), the degree at which characteristics are taken into account is variable.

3.4. Is the diversity of vegetation type within a farm an asset or indeed a necessity to feed animals? (third question)

Given relationships established between management practices and vegetation types, these results confirm the hypothesis that the vegetation types are more the result of management practices (defoliation regime, fertiliser) than their determinant. In other words, it is the targeted function of a field within the forage system that creates the vegetation types. The vegetation types seem to be a response to the management practices, for which agronomic characteristics (feeding value,...) are associated (Ansquer *et al.*, 2004 ; Duru *et al.*, 2004jvs).

The groupings of species according to leaf traits such as leaf dry matter content (Ryser and Lambers 1995, Ryser and Urbas 2000), as well as to ecological gradients (nutrient availability and defoliation regimes), and to ecosystem properties, has made it possible to attribute agronomic properties to the different grassland community types (Cruz *et al.*, 2002). Types 1 and 2, 3, 4, 5, respectively corresponded to the four grass species groups established previously in another mountain area (Cruz *et al.*, 2002). Grassland community types are functionally different. The herbage production and its quality both decrease from grassland community types 1 to 5. Growth in spring is earlier for 1 and 2 grassland community types. Types 4 and 5 could be harvested later than 1 or 2

because they flower later over the spring growth and the species have a longer leaf lifespan. Consequently, management practices are necessarily different between fields (inside a given farmland). But the flexibility that farmers have to distribute spatially the management practices is more restricted when the fields have characteristics that limit the range of feasible practices (non-mechanisable fields, fields far away from the cowshed). When these constraints increase, some fields are automatically allocated to a given use (grazing or cutting), and this choice is also associated to the appropriate management practices required to reach the targeted forage resources.

The diversity of management practices, that is generated or not by the diversity of field characteristics, has both environmental and economic reasons. Environmental reasons are structural. Indeed, under the latitude typical of the generated studied area, domestic herbivores should be fed both from grazing and conserved forage for wintering. Fertilization makes it possible to reduce the unitary production cost when forage is harvested mechanically because it depends more on the herbage dry matter per ha. This is not the case for grazed pastures (Duru and Hubert, 2003), at least as long as the available area per animal unit does not require intensifying the forage production. These raisons explain that the pastures which were grazed only (types 4 and 5) are not fertilised or are only fertilised very little.

Finally, the findings of this study agree with the lessons drawn by Stuth and Maraschin, 2000 (in white). Grassland managers not only aim to maximize vegetation growth over their entire grazing or cutting area but also through time. [White *et al.* \(2004\)](#) insist on the need for greater vegetation diversity as spatial and temporal scales increase (from field to farmland; from a season to a year) particularly where there is considerable variability in soil type, slope, elevation, aspect and climatic conditions. In other words, grassland community diversity has a functional role in farmland management, and this role of diversity could only be assessed over the entire managed area at farm level. As quoted by White *et al.*, (2004), a functionally diverse plant community over the entire managed area should be promoted beside high localized species diversity within grasslands as done usually.

Mis en forme : Anglais
(Royaume-Uni)

4. Conclusion

Management practices implemented to fulfil different functions in the feeding system generate functional plant community diversity between fields within a given farm. Studying decision rules has shown the role of topologic and topographic field characteristics on the spatial distribution of the management practices within the farmland. When the unfavorable field characteristics (slope, distance,...) concern a large part of the farmland area, they

overdetermine the management practices and consequently the vegetation types. When they concern a moderate part of the farmland area, they do not appear to be a great constraint for farmers. In fact, when these field characteristics are homogeneous between fields within a farm, the management practices, through the diversity of functions to fulfil, generate a diversity of vegetation types. In this way, we could say that there is functional plant diversity at the farm level. Only an intensification leading to abandoning the more sloping fields on the one hand and the increase of the proportion of conserved forage in the feeding system on the other hand, could lead to a strong decrease of the plant diversity at the farm level. Both approaches (field and farm levels) chosen to analyse the relationship between the field characteristics, the farming practices and the grassland community type, make it possible to identify the relationships that are generic or specific. What is observed in several farms is generic because a significant relationship means that farmers have the same behaviour. On the contrary, what is stated by a farmer is specific, as it was not significant for the whole data. The combination of these two analyses enables us to reveal relationships that are not statistically perceptible, but are in fact determining. This requires formalizing the management rules used by the farmers breaking down the decision making-process.

References

- Andrieu, N., Josien, E., Duru, M., 2004. Diversité du territoire de l'exploitation et sensibilité aux aléas climatiques : exemples d'élevages laitiers en Auvergne. Fourrages in press
- Ansquer, P., Cruz, P., Prévot, P., Theau, J. P., Jouany, C., Duru, M., 2004. Are structural plant traits relevant indicators of fertility level and cutting frequency in natural grasslands? In: Lüscher, A., Jeangros, B., Kessler, W., Huguenin, O., Lobsiger, M., Millar, N., Suter, D. (Eds.), Land use systems in grassland dominated regions. Grassland science in Europe 9, 760-762.
- Aubry, C., Papy, F., Capillon. A., 1998. Modelling Decision-Making Processes for annual Crop Management. Agricultural Systems 56, 45-65.
- Bakker, C., Blair, J.M., Knapp, A.K., 2004. Does resource availability, resource heterogeneity or species turnover mediate changes in plant species richness in grazed grasslands? Oecologia 137, 385-391.
- Balent, G., Alard, D., Blanfort, V., Gibon, A., 1998. Activités de pâturage, paysages et biodiversité. Annales de Zootechnie 47, 419-429.

- Bellon, S., Girard, N., Guerin, G., 1999. Caractériser les saisons-pratiques pour comprendre l'organisation d'une campagne de pâturage. Characterization of practices-seasons for understanding the planning of a grazing year. *Fourrages* 158, 115-132.
- Bernhard, N., 2002. Analyse spatiale du parcellaire et de ses contraintes dans les systèmes d'élevage laitier de montagne. Mémoire de fin d'étude, ENITA, Clermont-Ferrand.
- Bornard, A., Bassignana, M., Bernard-Brunet, C., Labonne, S., Cozic, P., 2004. La diversité végétale des alpages des Alpes internes françaises et italiennes. Influence du milieu et des pratiques. *Fourrages* 178, 153-170.
- Chanal, V., Lesca, H., Martinet, A.C., 1997. Vers une ingénierie de la recherche en sciences de gestion. *Revue Française de Gestion* 116, 41-51.
- Chatelin, M.H., Aubry, C., Leroy, P., Papy, F., Poussin, J.C., 1993. Pilotage de la production et aide à la décision stratégique. *Cahiers d'économie et sociologie rurales* 28, 119-138.
- Coléno, F.C., Duru, M., 1998. Gestion de production en systèmes d'élevage utilisateurs d'herbe : une approche par atelier. *Etudes et Recherches* 31, 45-61.
- Cruz, P., Duru, M., Therond, O., Theau, J.P., Ducourtieux, C., Jouany, C., Al Haj Khaled, R., Ansquer, P., 2002. Une nouvelle approche pour caractériser les prairies naturelles et leur valeur d'usage. A new approach to the characterization of natural grasslands and their use value. *Fourrages* 172, 335-354.
- Culos, X., Lardon, S., Osty, P. L., Triboulet, P., 1996. Modèle de représentation de l'organisation spatio temporelle des activités d'élevage. Calendriers de pâturage d'ovins sur le Causse Méjan (Lozère). In: Christophe, C., Lardon, S., Monestier P. (Eds.), *Etude des phénomènes spatiaux en agriculture. Les colloques de l'Inra*, 293-300.
- Diaz, S., Briske, D., McIntyre, S., 2001. Range management and plant functional types. In: Grice, A.C., Hodgkinson, K.C. (Eds.), *Global rangelands: progress and prospects*. CAB International, VI International Rangeland Congress on 'People and Rangelands: Building the Future', Townsville, Australia, 1999, 81-100.
- Dumont, B., Meuret, M., Boissy, A., Petit, M., 2001. Le pâturage vu par l'animal: mécanismes comportementaux et applications en élevage. Grazing from the animal's point of view: behavioural mechanisms and applications to animal husbandry. *Fourrages* 166, 213-238.
- Duru, M., Hubert, B., 2003. Management of grazing systems: from decision and biophysical models to principles for action. *Agronomie* 23, 689-703.
- Duru, M., Cruz, P., Magda, D., 2004. Using plant traits to compare sward structure and composition of grass species across environmental gradients. *Applied Vegetation Science* 7, 11-18.

- Fleury, P., Dubeuf, B., Jeannin, B., 1996. Forage management in dairy farms: a methodological approach. *Agricultural Systems* 52, 199-212.
- Gitay, H., Noble, I.R., 1997. What are functional types and how should we seek them ? In: Smith, T.M., Shugart, H.H. , Woodward, F.I. (Eds.), *Plant functional types: Their relevance to ecosystem properties and global changes*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 3-19.
- Grime, J.P., Hodgson, J.G., Hunt, R., 1988. *Comparative Plant Ecology*. Unwin Hyman, London.
- Guérin, G., Bellon, S., 1990. Analyse des fonctions des surfaces pastorales dans des systèmes de pâturage méditerranéens. *Etudes et Recherches Syst. Agraires Dév.* 17, 147-158.
- Hémidy, L., Maxime, F., Soler, L. G., 1993. Instrumentation et pilotage stratégique dans l'entreprise agricole. *Cahiers d'économie et sociologie rurales* 28, 91-118.
- Hooper, D.U., Vitousek, P.M., 1997. The effects of plant composition and diversity on ecosystem processes. *Science* 277, 1302-1305.
- Huston, M.A., 1994. *Biological diversity, The coexistence of species on changing landscapes*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Josien, E., Dedieu, B., Chassaing, C., 1994. Etude de l'utilisation du territoire en élevage herbager. L'exemple du réseau extensif bovin Limousin. *Fourrages* 138, 115-134.
- Kirchmann, H., Thorvaldsson, G., 2000. Challenging targets for future agriculture. *European J.Agron.* 12, 145-161.
- Kleyer, M., 1999. Distribution of plant functional types along gradients of disturbance intensity and resource supply in an agricultural landscape. *Journal of Vegetation Science* 10, 697-708.
- Landais, E., Deffontaines, J.P., 1988. Les pratiques des agriculteurs. Point de vue sur un nouveau courant de la recherche agronomique. *Etudes Rurales* 109, 125-158.
- Landsberg, J., James, C.D., Morton, S.R., Muller, W.J., Stol, J., 2003, Abundance and composition of plant species along grazing gradients in Australian rangelands. *Journal of Applied Ecology* 40, 1008-1024.
- Lavorel, S., 2002. Plant functional types. In: H.A. Money, H.A., Canadell, J. (Eds.), *The earth system: Biological and ecological dimensions of global environmental changes*. John Wiley & Sons, Chichester, vol 2, pp 481-489.
- Legros, J. P., Robbez-Masson, J.M., Falipou, P., Antonioletti, R., Durand R., 1997, *Bibliothèque FLASH de calcul de l'énergie solaire*. Cinq programmes INRA-Science du Sol-Montpellier.
- Lieffers, V.J., Larkin-Lieffers, P.A., 1987. Slope, aspect and slope position as factors controlling grassland communities in the coulees of the Oldman river, Alberta. *Canadian Journal of Botany* 65, 1371-1378.

- Morlon, P., Benoit, M., 1990. Etude méthodologique d'un parcellaire d'exploitation agricole en tant que système. *Agronomie*, 6, 499-508
- Papy, F., 1999. Agriculture et organisation du territoire par les exploitations agricoles : enjeux, concepts, questions de recherche. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 85 (7), 233-244.
- Pfeffer, K., Pebesma, E.J., Burrough, P.A., 2004. Mapping alpine vegetation using vegetation observations and topographic attributes. *Landscape Ecology* 18, 759-776.
- Réseaux d'élevage, 2001. Référentiel fourrager : caractérisation des zones et des systèmes fourragers d'Auvergne et de Lozère, 8, 4 p.
- Roy, B., 1992. Science de la décision ou science d'aide à la décision ? *Revue internationale de systémique*, 6, 497-529.
- Ryser, P., Lambers, H., 1995. Root and leaf attributes accounting for the performance of fast- and slow-growing grasses at different nutrient supply. *Plant and Soil* 170, 251-265.
- Ryser, P., Urbas, P., 2000. Ecological significance of leaf life span among Central European grass species. *Oikos* 91, 41-50.
- Stuth, J., Maraschin, G.E., 2000. Sustainable management of pasture and rangelands. In: Lemaire, G., Hodgson, J., Moraes, A.D., Nabinger, C., Carvalho, P.C.D.F. (Eds.), *Grassland Ecophysiology and Grazing Ecology*. CAB International, Wallingford, 339-354.
- Tasser, E., Tappeiner, U., 2002. Impact of land use changes on mountain vegetation. *Appl. Veg. Sci.* 5, 173-184.
- Thenail, C., Baudry, J., 2004. Variation of farm spatial land use pattern according to the structure of the hedgerow network (bocage) landscape: a case study in northeast Brittany. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 101, 53-72.
- White, T.A., Barker, D.J., Moore, K.J., 2004. Vegetation diversity, growth, quality and decomposition in managed grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 10, 73-84.

Caption of figure

Figure 1 Grassland fields characteristics: topographic and topologic, management practices, and type of vegetation

Table 1
Characterisation of livestock farms

Farmer	Pedoclimatic zone	Altitude (m absl)	Conserved forage	Total area (ha)	Animal units	Non mechanisable area (%)	Cut area / mechanisable area (%)	Area (ha) per animal unit available for cutting	Stocking rate
Be	volcanic (only grassland)	1104	ventilated hay	63,5	67	48	100	0,49	0,9
Go	volcanic (only grassland)	1050	silage + field-dried hay	98	116	10	50	0,76	1,15
Ch	volcanic (only grassland)	1102	wrapping+ field-dried hay	65,8	56	51	100	0,58	0,84
Ma	volcanic (only grassland)	921	field-dried hay	42	43	17	64	0,81	1,02
Am	volcanic (only grassland)	556	field-dried hay	40	44	13	69	0,79	1
Mo	granitic	929	silage + field-dried hay	39	43	10	67	0,82	1,1
Me	ploughed volcanic	1100	field-dried hay	49	42	25	65	0,88	0,9

Table 2

Codification of the fertilisation and farming practices

Fertilisation	Score	Harvesting type	Score
NPK + slurry	6	Early harvesting at least once (silage, wrapping, ventilated hay)	1
PK+ slurry	5	Late harvesting at least once (field-dried hay)	2
NPK	4	No harvesting	3
N	3		
PK	2		
Nothing	1		

Table 3

Correlation between type of vegetation and field characteristics (see Table 2)

Field characteristics	Type of vegetation
Altitude	ns
Orientation	ns
Distance	ns
Surface area	ns
Mechanisability	0.63***

Table 4
Correlation between type of vegetation and management practices

Management practices	Type of vegetation
Harvesting type	0.63***
Fertilisation	-0.52***
Date of the first defoliation	0.26**

Table 5

Average score and standard deviations of the management practices, types of vegetation and field characteristics calculated for each farm

Farmers	Field characteristics					Management practices			type of vegetation
	altitude	orientation	slope	distance	area of a field	date of the first defoliation	cutting	fertilisation	
Am	556 (37)	1.8 (0.4)	1.2 (0.4)	0.4 (0.8)	3.9 (1.6)	11 (29)	1.8 (0.9)	4 (1.4)	3.2 (0.4)
Be	1104 (56)	2 (0.9)	1.5 (0.5)	1.3 (1.4)	2.8 (2.1)	139 (24)	2.1 (0.9)	3.4 (1.7)	3.2 (1.3)
Ch	1102 (136)	2.2 (0.6)	1.4 (0.5)	1.9 (1.2)	2.3 (1.1)	146 (27)	2 (0.9)	4.6 (0.9)	3.2 (1.1)
Go	1050 (13)	1.2 (0.2)	1.1 (0.3)	0.4 (0.3)	7.1 (4.3)	154 (21)	2.4 (0.8)	3.6 (0.8)	2.9 (1)
Ma	921 (26)	1.4 (0.3)	1.3 (0.3)	1.2 (1.3)	1.4 (1.1)	124 (23)	2.7 (0.4)	2.9 (0.9)	3.1 (1.1)
Me	1003 (45)	1.8 (1.0)	1.2 (0.4)	0.7 (0.7)	1.7 (1.4)	169 (13)	2.4 (0.5)	3.4 (1.2)	3.3 (1.1)
Mo	927 (43)	1.4 (0.4)	1 (0.3)	1.6 (1.3)	1.2 (0.8)	142 (26)	1 (0)	4.2 (1.2)	3.1 (1)

Table 6:

Area (%) of the different production units for each type of vegetation with 1: silage, ventilated hay or wrapping ; 2 : field-dried hay; 3 grazing

Farmers	Grassland type (1...5)														
	Type1			Type2			Type3			Type4			Type5		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Am	0	0	0	0	0	0	0	77	23	0	0	100	0	0	0
Be	100	0	0	100	0	0	3	36	61	0	0	100	0	0	100
Ch	0	0	0	64	36	0	0	100	0	0	4	96	0	0	100
Go	0	100	0	100	0	0	0	21	79	0	0	100	0	0	100
Ma	0	100	0	0	67	33	0	41	59	0	29	71	0	0	0
Me	0	100	0	0	100	0	0	86	14	0	24	76	0	0	100
Mo	100	0	0	91	0	9	0	100	0	0	24	76	0	0	0

Table 7

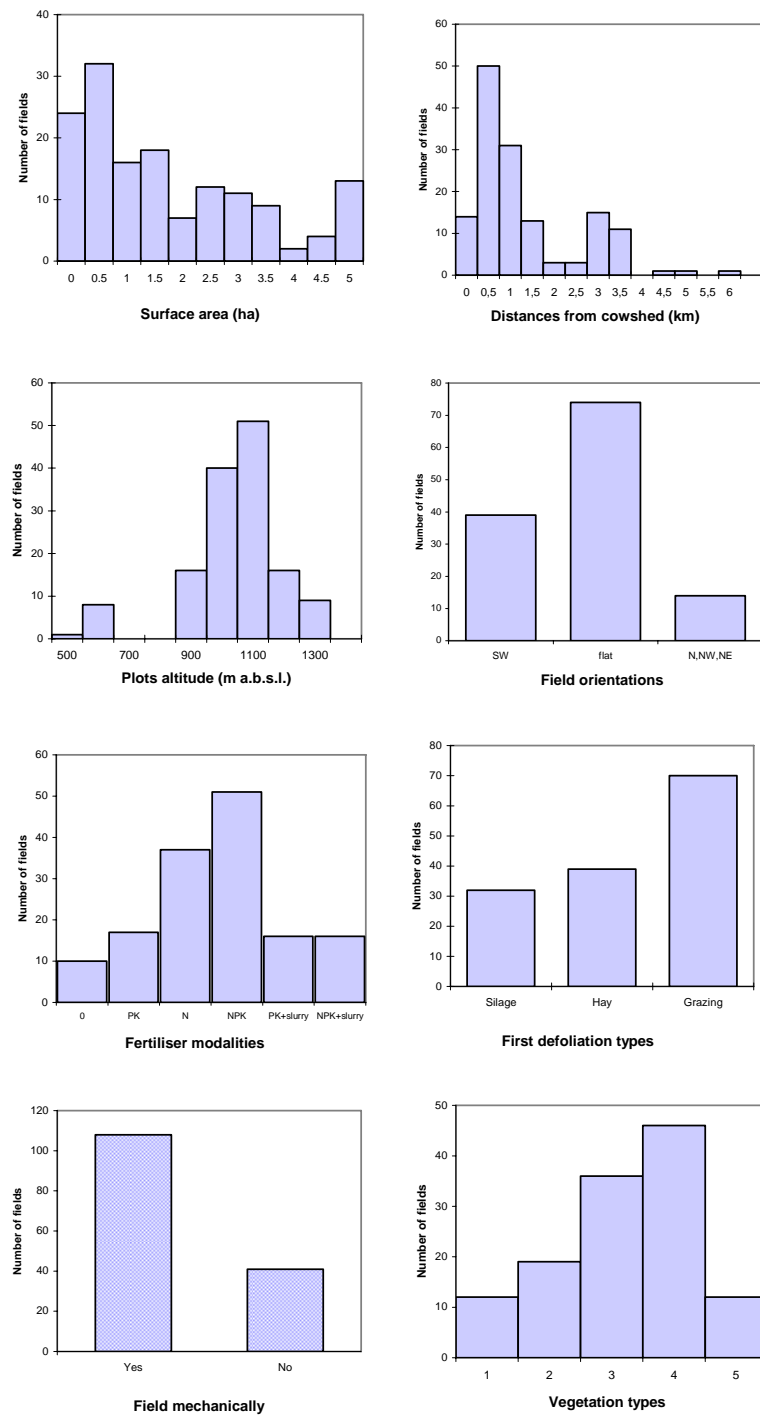
Correlation between management practices with field characteristics

Field characteristics	Management practices		
	Harvesting type	Fertilisation	Date of the first defoliation
Altitude	ns	ns	0.37***
Orientation	ns	ns	ns
Distance	ns	ns	0.32***
Surface area	ns	ns	ns
Mechanisability	0.50***	0.46***	0.24**

Table 8**Field characteristics taken into account by farmers for their allocation to the different production units**

Farmers	Grazed grasslands	Early harvested grasslands for conserved forage (silage, wrapping, ventilated hay)	Field-dried hay
Be	Distance (1.13 km)	Orientation (65% of the fields facing south)	Orientation (42 % of the fields facing south)
	Slope (100% non mechanisable)	Altitude (1080 m)	Altitude (1160 m)
		Distance (0.78 km)	Distance (2.22 km)
Go	Distance (0.49 km)	Distance (0.39 km)	Distance (0.87 km)
		Slope, Surface area (8 ha)	Slope, Surface area (2 ha)
Ch	Altitude (1223 m)	Orientation (100% of the fields facing south)	Orientation (80% of the fields are south-facing slope)
		Altitude (1125 m)	Altitude (1150 m)
Ma	Distance (0.19 km)	-	Distance (1.88 km)
			Slope
Am	Distance (0.18 km)	-	Distance (0.53 km)
			Slope
Me	Distance (0.43 km)	-	Distance (0.84 km)
			Slope
Mo	Distance (0.47 km)	Vegetation type (100% type 1 or 2)	Vegetation type (100 % type 3 or 4)

Figure 1



Annexe 6 : Le modèle de croissance de l'herbe

La biomasse sur pied Q d'une parcelle résulte de l'accumulation de biomasse à un pas de temps quotidien. Elle se calcule de la façon suivante :

$$Q(j) = Q(j-1) + CB(j-1) - S(j-1)$$

Ce calcul met en jeu trois sous-modèles :

- le sous-modèle de croissance ;
- le sous-modèle de sénescence ;
- le sous-modèle sol.

L'ensemble des variables de ces trois sous-modèles est représenté dans le tableau 1.

L'ensemble des variables climatiques utilisées est représenté dans le tableau 2.

3.1 *Le sous-modèle de croissance*

3.1.1 *La croissance brute CB*

$$CB = PAR \times RUE$$

Avec PAR, le rayonnement utile à la photosynthèse et RUE l'efficacité de conversion du rayonnement intercepté.

3.1.2 *Le rayonnement utile à la photosynthèse intercepté PAR*

$$PAR = 0.48 \times Ryt(j-1) \times 0.8 \times RIE$$

Avec $Ryt(j-1)$ le rayonnement incident de la veille et RIE l'efficacité d'interception du rayonnement.

$$RIE = 0.95 \times (1 - e^{-0.5 \times LAI(j)})$$

Avec $LAI(j)$, l'indice foliaire.

$$LAI(j) = LAI(j-1) + LAI\text{ brute}(j-1)^1$$

L'indice foliaire la veille $LAI(j-1)$ et la croissance de cet indice la veille $LAI\text{ brute}(j-1)$.

$$LAI\text{ brute}(j) = 0.376 \times \min(T(j), 18)^2 \times NI \times 1.71 \times 10^{-3}$$

NI étant l'indice de nutrition azotée et $T(j)$, la température du jour. L'indice de nutrition azotée est fonction du type de végétation (tableau 3). Sa valeur figure dans le tableau 4.

3.1.3 L'efficacité de conversion du rayonnement intercepté RUE

$$RUE = NI \times Hi \times 2 \times t \times al \times ph$$

Hi , étant l'indice hydrique calculé par le sous modèle sol (section 1.3), t un facteur thermique, al un facteur saisonnier, ph un facteur phénologique.

Le facteur t se calcule de la façon suivante :

$$t = 0.037 + 0.09 \times \min(T, 18) - 0.0022 \times \min(T(j), 18)^2$$

Le facteur al évolue au cours du temps :

- le 1^{er} février : $al = 2$;
- du 2 au 30 octobre : $al = - (0.4 / 272) \times j + 2$;
- du 1^{er} novembre au 31 janvier : $al = 1.6$.

¹ Après un pâturage $LAI = 1$, après une fauche $LAI = 0$

Le facteur ph est la première adaptation réalisée pour notre recherche. Il permet de décrire pour chaque type de végétation (tableau 3), l'augmentation de biomasse entre le début-montaison et la floraison. Pour chaque type de végétation, des constantes spécifiques sont utilisées, elles indiquent notamment les dates de début-montaison et floraison (tableau 4).

Pour le calcul du facteur ph il faut distinguer pour les périodes bornées par les dates de début-montaison et de floraison, des cas avec ou sans défoliation. Lorsque la parcelle n'est pas défoliée (ou que cette défoliation intervient avant la date de début-montaison) la repousse passe à partir de la montaison de l'état végétatif à l'état reproductif. Lorsqu'une défoliation intervient après la montaison, la repousse est végétative.

Avant la montaison :

si défoliation ph = 1

si pas de défoliation ph = 1

Entre la montaison et la floraison :

si défoliation ph = 1

si pas de défoliation depuis la date de début-montaison :

$$ph = a \left(\sum_{01/02}^j \min(T, 18) \right)^2 + b \sum_{01/02}^j \min(T, 18) + c$$

Après la floraison :

si défoliation ph = 1

si pas de défoliation depuis la date de montaison : ph = 2 - phmax

phmax est la valeur maximale prise par le facteur.

$$phmax = a x_{max}^2 + b x_{max} + c$$

$$x_{max} = (date\ montaison + date\ floraison)/2$$

a, b, c étant des constantes (tableau 5)

3.2 Le sous-modèle de sénescence (S)

La distinction entre sénescence végétative et reproductive est la seconde adaptation réalisée dans le cadre de notre recherche. Nous considérons que durant la phase reproductive, la sénescence ne s'applique qu'à la fraction de feuille.

3.2.1 La sénescence végétative

La sénescence est végétative si la somme des températures depuis le 1^{er} février² est inférieure à 2 durées de vie des feuilles DVF ou si il y a eu défoliation après la date de début-montaison. La durée de vie des feuilles varie en fonction du type de végétation (tableaux 3 et 4). STD est la somme des températures depuis la dernière défoliation. Elle est confondue avec la somme des températures depuis le 1^{er} février lorsque la parcelle n'a jamais été défoliée.

Si $STD < DVF$:

$$S = 0.85 \times Br \times \min(T(j), 18) / DVF$$

Si $STD \geq DVF$

$$S = 0.85 \times Q(j-1) \times \min(T(j), 18) / DVF$$

Br est la biomasse résiduelle après défoliation. Après une fauche elle est de 125gm-2, après un pâturage elle peut être supérieure à cette quantité.

3.2.2 La sénescence reproductive

La sénescence est reproductive si la somme des températures depuis le 1^{er} février est supérieure à 2 durées de vie des feuilles et à condition qu'il n'y ait pas eu défoliation après la date de début-montaison.

Si $STD < DVF$:

$$S = 0.85 \times 0.824 \times Br^{-0.58} \times \min(T(j), 18) / DVF$$

² Le cumul des températures est calculé en base 0, limite supérieure de 18 °C

Si $STD \geq DVF$

$$S = 0.85 \times 0.824 \times Q(j-1)^{-0.58} \times \min(T(j), 18) / DVF$$

3.3 Le sous-modèle sol

3.3.1 La réserve disponible RD

$$RD(j) = \min(P(j-1) + RD(j-1) - ETR(j-1), RU)$$

Avec ETR, l'évapotranspiration réelle.

$$ETR(j) = \min(ETP(j), RD(j))$$

3.3.2 L'indice hydrique

Si $RD \geq 50\% RU$ alors $H_i = 1$

Si $RD < 50\% RU$ alors $H_i = ETR/ETP$

La prise en compte du taux de remplissage de la réserve utile dans le calcul de l'indice hydrique est la troisième adaptation du modèle.

Tableau 1 : Variables du modèle croissance de l'herbe

Variable	Description	Unités
al	Facteur saisonnier	-
t	Facteur thermique	-
ETR	Evapotranspiration réelle	mm
Hi	Indice hydrique	-
LAI	Leaf area index	-
LAI brute	Augmentation du lai lié à la croissance	-
Ni	Indice de nutrition azotée	-
PAR	Facteur saisonnier	-
ph	Rayonnement utile à la photosynthèse intercepté	MJ.m ⁻²
Q	Biomasse sur pied	g.m ⁻²
RD	Réserve disponible	mm
RIE	Efficiency d'interception du rayonnement	-
RU	Réserve utile	mm
RUE	Efficiency de conversion du rayonnement intercepté en biomasse aérienne	g.MJ ⁻²
Ryt	Rayonnement global	MJ.m ⁻²
S	Sénescence	g.m ⁻²

Tableau 2 : Les variables climatiques utilisées par le modèle

Variable	Description	Unités
Ryt	Rayonnement global	MJ.m ⁻²
P	Précipitation	mm
ETP	Evapotranspiration potentielle	mm
T	Température moyenne	°C

Tableau 3 : Les types de végétations

Type	Description de la végétation
1	Graminées à feuilles larges productives (Ray-Grass, Dactyle) et une proportion de légumineuse de plus de 10%
2	Graminées à feuilles larges productives (Ray-Grass, Dactyle) et quasi-absence voire absence totale de légumineuse
3	Graminées à feuilles larges moins productives que les deux catégories précédentes (houlque laineuse, pâturin, vulpin...)
4	Mélange de graminées à feuilles larges (espèces citées précédemment) et étroites (Fétuque Rouge, Agrostis, Flouve)
5	Majorité de graminées à feuilles étroites de milieu pauvre (Nard Raide) ainsi que présence de petits ligneux

Tableau 4 : Indice de nutrition azotée, durée de vie des feuilles et stades des différents types de végétation

Type de végétation	Niveau de nutrition (0-1) : Ni	Durée de vie des feuilles (en degré jour)*	Date floraison (en degré jour)*	Date de début-montaison **
1	0.85	600	1200	500
2	0.75	500	1200	500
3	0.65	600	1400	700
4	0.55	800	1600	900
5	0.45	1000	1800	1100

* à compter du premier février

** si pâturage ou fauche après cette date, la repousse est végétative ; elle est reproductive dans le cas contraire

Tableau 5 : Valeurs des constantes a, b et c pour chaque type de végétation

Type de végétation	A	B	C
1	-1.22E-06	$2.08 * 10^{-3}$	$2.653 * 10^{-1}$
2	-5.31E-06	$9.02 * 10^{-3}$	-2.18
3	-4.49E-06	$9.43 * 10^{-3}$	-3.4
4	-3.67E-06	$9.18 * 10^{-3}$	-4.29
5	-2.04E-06	$5.92 * 10^{-3}$	-3.04

Table des matières

Remerciements	2
Sommaire	3
Liste des figures	6
Liste des tableaux	8

Introduction générale.....	10
-----------------------------------	-----------

1 Systèmes d'élevage extensifs et diversité du territoire de l'exploitation agricole.....	11
2 Les systèmes d'élevage extensifs en montagne.....	12
3 Objectif de la recherche et zone d'étude	14
4 Plan de la thèse	16

Première partie : Présentation de la problématique.....	18
--	-----------

Introduction	19
---------------------------	-----------

Chapitre 1 - Définition des principaux concepts mobilisés	20
--	-----------

Introduction	20
--------------------	----

1 Sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques	20
1.1 Le système fourrager	20
1.2 Les aléas climatiques.....	21
1.3 Définition de la sensibilité aux aléas climatiques	22
2 Utilisation du territoire et sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques	24
2.1 Définition de l'utilisation du territoire	24
2.2 Différentes régulations pour limiter la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques	26
3 La représentation des décisions de l'éleveur	27
3.1 Le modèle d'action.....	27
3.2 Décomposition du système de production	28
3.3 Règles de dimensionnement, coordination et ordonnancement	30
3.4 Planification et pilotage.....	30

Conclusion.....	33
-----------------	----

Chapitre 2 – Présentation de la problématique.....	34
---	-----------

Introduction	34
--------------------	----

1 Objet d'étude et simplifications.....	34
2 Question de recherche et hypothèses de travail.....	37

2.1	Question de recherche	37
2.2	Hypothèses de travail	38
2.2.1	Hypothèse 1 : dimensionnement et diversité du territoire.....	39
2.2.2	Hypothèse 2 : ordonnancement et diversité du territoire	40
3	Démarche générale	41
3.1	Etude empirique des stratégies d'utilisation du territoire.....	41
3.2	Construction d'un modèle du système fourrager	42
3.3	Simulation et évaluation de stratégies d'utilisation du territoire pour leur sensibilité aux aléas climatiques.....	42
	Conclusion de la première partie.....	44
Deuxième Partie : Identification empirique de différentes stratégies d'utilisation du territoire		45
	Introduction	46
	Chapitre 3 - Les enquêtes exploratoires.....	47
	Introduction	47
1	Méthode.....	47
1.1	Zone d'étude.....	47
1.2	Echantillon	48
1.3	Informations recueillies.....	50
2	Principaux résultats des enquêtes exploratoires	50
2.1	Variabilité spatiale.....	51
2.2	Déterminants de l'utilisation du territoire	51
2.2.1	La structuration temporelle de la campagne fourragère.....	51
2.2.1.1	La mise à l'herbe des vaches laitières	52
2.2.1.2	La première coupe.....	53
2.2.1.3	La récolte des regains.....	54
2.2.1.4	Le pâturage estival	54
2.2.1.5	La rentrée des animaux à l'étable.....	54
2.2.2	Première identification des critères pris en compte pour l'affectation des parcelles aux différentes activités.....	55
2.2.3	Ordre d'utilisation des parcelles.....	58
2.2.3.1	Choix de la parcelle suivante	58
2.2.3.2	Règle de passage d'une parcelle à l'autre pour le pâturage	58
2.2.4	Surfaces tampons et souplesse du système fourrager.....	59
	Conclusion.....	62
	Chapitre 4 - Le suivi.....	64
	Introduction	64
1	Méthode.....	65
1.1	Découpage du système fourrager en ateliers et identification des règles de dimensionnement, ordonnancement et coordination.....	65

1.2	Echantillon	67
1.3	Données recueillies	69
1.3.1	Données climatiques	69
1.3.2	Enquêtes	69
1.3.3	Calendrier de pâturage	70
1.3.4	Tour de plaine.....	71
2	Résultats.....	72
2.1	Normales et climat de l'année 2002	72
2.1.1	Les normales	72
2.1.1.1	Températures	73
2.1.1.2	Pluviométrie	73
2.1.1.3	La variabilité inter-annuelle des températures et de la pluviométrie	75
2.1.2	Caractéristiques des conditions météorologiques de la campagne 2002 (mars à novembre) par rapport aux normales	76
2.1.2.1	Les températures 2002	76
2.1.2.2	Les précipitations 2002	78
2.2	Présentation générale des élevages suivis	78
2.3	Comparaison des systèmes.....	83
2.3.1	Dimensionnement.....	83
2.3.1.1	Dimensionnement réalisé en 2002	83
2.3.1.2	Les ajustements du dimensionnement.....	98
2.3.1.3	Dimensionnement et diversité du territoire.....	102
2.3.1.4	Les animaux en croissance ou à l'entretien.....	109
2.3.2	L'ordonnancement	111
2.3.2.1	L'ordonnancement réalisé en 2002	111
2.3.2.2	Les ajustements de l'ordonnancement et la prise en compte de la diversité du territoire	115
2.3.2.3	Diversité du territoire <i>versus</i> travail.....	119
2.4	Identification de stratégies d'utilisation du territoire et schématisation du sous-système décisionnel.....	120
2.4.1	Dimensionnement, ordonnancement et mode de récolte	120
2.4.2	Les types d'ajustements de l'utilisation du territoire et la diversité du territoire 121	
2.4.3	Définition des stratégies d'utilisation du territoire à comparer par modélisation.....	124
2.4.4	Structure générale du modèle décisionnel.....	125
2.4.4.1	Schéma général des règles de dimensionnement et d'ordonnancement à modéliser	126
	Conclusion.....	130
	Conclusion de la deuxième partie	132
Troisième partie : Etude à l'aide d'un modèle de la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques		133
	Introduction	134
	Chapitre 5 : Quel modèle construire ?	135
	Introduction	135

1	Modélisation, définition des concepts de base	136
2	La validation des modèles	137
3	Les différents modèles d'exploitations d'élevage	140
3.1	Des utilisations différentes	140
3.1.1	Les modèles d'aide à la décision et les modèles de recherche	140
3.1.2	Optimisation et simulation	142
3.2	Des techniques de modélisation différentes	143
3.3	Des articulations différentes entre les composantes biophysiques et décisionnelles	144
4	L'élaboration du modèle	145
4.1	Le niveau d'abstraction, et le pas de temps du modèle	145
4.2	Choix du modèle de croissance de l'herbe	146
4.3	Technique de modélisation : Simulation, approche orientée objet	149
	Conclusion	150
	Chapitre 6 : Présentation du modèle du système fourrager	151
	Introduction	151
1	Simplifications générales	151
2	Entrées	153
2.1	Fichier climatique	153
2.2	Fichier décrivant une stratégie d'utilisation du territoire	154
2.3	Exploitation	154
3	Structure générale du modèle	155
4	Le sous-modèle biophysique	155
4.1	Module parcelle	155
4.2	Module croissance de l'herbe	159
4.2.1	Prise en compte du type de végétation et de la réserve utile	160
4.2.1.1	Modifications du sous-modèle de croissance	160
4.2.1.2	Modifications du sous-modèle de sénescence	161
4.2.1.3	Modifications du sous-modèle sol	161
4.2.2	Prise en compte de l'altitude	161
4.2.3	Prise en compte de l'exposition	162
4.3	Module animal	162
5	Le sous-modèle décisionnel	162
5.1	Simplifications	163
5.2	Stratégie 1	165
5.2.1	Règles de planification	166
5.2.1.1	Printemps	166
5.2.1.2	Été	168
5.2.1.3	Automne	169

5.2.2	Règles de pilotage	169
5.3	Stratégie 2.....	172
5.3.1	Nature des parcelles de l'atelier pâturage	172
5.3.2	Nature des parcelles des ateliers foin de première coupe et regain.....	173
5.4	Stratégie 3.....	174
6	Sorties	174
7	La Validation du modèle	175
7.1	La démarche adoptée.....	175
7.2	Commentaires et suggestions des experts	181
7.2.1	Commentaires sur le modèle biophysique	181
7.2.2	Commentaires sur le modèle du système fourrager et les règles de décision	181
7.2.3	Corrections apportées au modèle, à la suite de la phase de validation.....	183
	Conclusion.....	183
Chapitre 7 : Comparaison par simulation des stratégies de décision pour différents territoires d'exploitation et séries climatiques		184
	Introduction	184
1	Matériel et méthode	184
1.1	Les différentes simulations.....	184
1.1.1	Simuler les différentes stratégies d'utilisation du territoire	184
1.1.2	Deux types de séries climatiques	185
1.1.3	Les deux types de diversité du territoire utilisés	190
1.1.4	Simuler pour chaque type de territoire, différentes organisations spatiales...	192
1.2	Indicateurs d'évaluation des scénarios	194
1.3	Le traitement des données	195
1.3.1	Pour chaque scénario.....	195
1.3.2	Comparaison des scénarios	196
2	Résultats.....	196
2.1	Tendance générale des facteurs stratégie, climat et territoire	197
2.1.1	Effet stratégie	197
2.1.1.1	Récoltes de fourrages stockés	197
2.1.1.2	Distributions de foin au pâturage	198
2.1.1.3	Ventes de foin.....	199
2.1.1.4	Achats de foin.....	200
2.1.1.5	Date de mise à l'herbe	201
2.1.1.6	Date de rentrée à l'étable.....	202
2.1.1.7	Date de début de l'atelier foin	202
2.1.1.8	Date de fin de l'atelier foin	202
2.1.1.9	Qualité du foin.....	203
2.1.1.10	L'indicateur synthétique.....	203
2.1.2	Effet climat	204
2.1.3	Effet territoire d'exploitation	209
2.1.3.1	Le niveau de diversité du territoire	209
2.1.3.2	L'organisation du territoire	211

2.2	La variabilité des résultats de production.....	214
2.2.1	Comparaison des stratégies 2 et 1	214
2.2.1.1	Effet climat.....	220
2.2.1.2	Effet territoire d'exploitation	220
2.2.2	Comparaison des stratégies 3 et 1	225
2.2.2.1	Effet climat.....	226
2.2.2.2	Effet territoire d'exploitation	226
2.3	Arbitrage entre réalisme et test d'hypothèse	227
2.4	Validation ou non des hypothèses	228
	Conclusion.....	232
	Conclusion de la troisième partie	233

Conclusions générales	234
------------------------------------	------------

1	Originalité du travail.....	236
1.1	Recherche d'une nouvelle piste pour limiter la sensibilité aux aléas climatiques	236
1.2	Les modèles du système fourrager ne simulent pas la diversité du territoire	237
2	L'hypothèse de départ infirmée	240
3	Les restrictions réalisées.....	240
3.1	Les restrictions de l'objet d'étude	241
3.2	Les restrictions du modèle.....	242
3.3	Une validation partielle	244
4	Perspectives	245
4.1	Les données climatiques.....	245
4.2	Amélioration de l'outil	246
4.2.1	Le module animal.....	247
4.2.2	Les règles de décision	248

Bibliographie.....	250
---------------------------	------------

Annexes	259
----------------------	------------

Annexe 1 : Questionnaire de pré-enquêtes.....	260
Annexe 2 : Diagrammes de pilotage simplifiés des ateliers pâturage des vaches laitières et production de fourrages stockés	260
Annexe 3 : Guide d'entretien pour le suivi de la séquence de printemps	272
Annexe 4 : Apports de concentrés et de fertilisants	273
Annexe 5 : article soumis à <i>Agriculture Ecosystems & Environment</i>	274
Annexe 6 : Le modèle de croissance de l'herbe.....	301

Résumé

Au sein du système fourrager, les aléas climatiques rendent difficile l'articulation entre l'offre fourragère et la demande du troupeau et engendrent des difficultés de gestion du pâturage ou des stocks fourragers. Pour limiter la sensibilité du système fourrager à ces aléas, l'éleveur peut avoir recours à des intrants (achats de stocks, fertilisation, concentrés), mais peut aussi y parvenir en utilisant les ressources internes de son exploitation. Le territoire d'exploitation présente une diversité en termes de végétation, sol, altitude ou exposition. Nous faisons l'hypothèse que *l'utilisation de cette diversité du territoire* par l'éleveur permet de limiter la *sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques*.

Nous définissons la sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques comme la variabilité inter-annuelle des résultats de production. Cette recherche requiert donc une échelle d'étude pluriannuelle et nécessite le recours à la modélisation pour disposer rapidement de résultats sur plusieurs années. Le modèle du système fourrager simule les règles d'utilisation du territoire d'exploitation grâce à un *sous-modèle décisionnel*. Il simule d'autre part la croissance de l'herbe en fonction des aléas climatiques, de la diversité du territoire et des interventions techniques grâce à un *sous-modèle biophysique*.

Une phase empirique a permis d'élaborer la structure générale du sous-modèle décisionnel ainsi que ses variantes correspondant à trois stratégies d'utilisation du territoire à comparer. Le sous-modèle biophysique a été choisi au sein de la bibliographie mais nous l'avons adapté afin qu'il prenne en compte la diversité inter-parcellaire de végétation, d'exposition, d'altitude. Nous avons alors simulé les trois stratégies pour deux séries climatiques et deux niveaux de diversité du territoire. Nous n'avons pas constaté de diminution de la variabilité inter-annuelle de la production fourragère permise par la mise à profit de la diversité du territoire, ce qui compte tenu de la définition retenue équivaut à rejeter notre hypothèse de départ. Cependant, dans la mesure où cette mise à profit de la diversité permet chaque année d'améliorer l'autonomie fourragère (grâce à une diminution des achats de foin, une augmentation des quantités stocks fourragers récoltés, vendues et enfin une amélioration de la qualité du foin) nous concluons qu'elle constitue un atout dans la conduite des systèmes d'élevage extensifs.

Climatic hazards make difficult the articulation between forage supply and herd demand and consequently management difficulties of forage system. In order to limit inter-annual variability of production results that we call "sensitivity to climatic uncertainty", the farmer can use external inputs (purchases of stocks, fertilization, concentrates), but can also use internal resources of his farm. The farm territory presents a between-field diversity in terms of vegetation, ground, altitude or exposure. We make the hypothesis that if the farmer land use management practices take into account the farm territory diversity, these practices can limit the sensitivity to climatic uncertainty. This research requires a multiannual study-scale and the use of simulation model to achieve results quickly. On the one hand the forage system model simulates the land use management practices thanks to a decision-making sub-model. On the other hand it simulates the grass growth according to weather, the farm territory diversity and technical interventions thanks to a biophysical sub-model.

An empirical phase allowed elaborating the general structure of the decision-making sub-model as well as its variants corresponding to three land use management strategies. The biophysical sub-model was chosen in the bibliography but we adapted it to take into account the between-field diversity of vegetation, exposure and altitude. We then simulated the three strategies for two climatic series and two farm territory diversity levels. We did not notice a decrease of the fodder production variability allowed by the farm territory diversity, which means to reject our hypothesis. However as it allows improving the system self-sufficiency (thanks to a decrease of purchases of hay, an increase of harvests, sales and quality of forage supplies) we concluded that it constitutes a trump card of the extensive farming systems.